



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Институт новых материалов  
и технологий**

**О. Б. КОЛМАЧИХИНА  
С. Э. ПОЛЫГАЛОВ**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПО ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ МЕДИ

Учебно-методическое пособие





Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

О. Б. Колмачихина  
С. Э. Польшгалов

# **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПО ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ МЕДИ**

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
для студентов вуза, обучающихся  
по направлению подготовки  
22.03.02 — Металлургия

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2021

УДК 669.331(075.8)

ББК 34.33я73

К60

Рецензенты:

гендиректор Кыштымского медеелектролитного завода *А. В. Кудрявцев*;  
каф. хим. технологии Урал. гос. лесотехн. ун-та (протокол № 4 от  
17.11.2020 г.) (завкаф. д-р техн. наук, проф. *Ю. Л. Юрьев*)

Научный редактор — д-р техн. наук *С. В. Мамяченков*

**Колмачихина, О. Б.**

К60 Технологические расчеты по пирометаллургии меди : учебно-методическое пособие / О. Б. Колмачихина, С. Э. Польшгалов ; М-во науки и высш. образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 197, [1] с., [10] л. отд. ил.

ISBN 978-5-7996-3273-1

В пособии изложены основы теории получения меди из сульфидного сырья; приведены методики технологических расчетов шихты, материальных и тепловых балансов плавки на штейн, конвертирования медных штейнов и огневого рафинирования черновой меди.

Пособие предназначено для студентов старших курсов бакалавриата, обучающихся по специальности «Металлургия», для выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ.

Табл. 135. Рис. 11.

УДК 669.331(075.8)

ББК 34.33я73

ISBN 978-5-7996-3273-1

© Уральский федеральный  
университет, 2021

---

## Введение

---

**М**едеплавильные предприятия в настоящее время сталкиваются с тем, что сырье, поступающее в переработку, становится все беднее, увеличивается содержание вредных компонентов, возрастает доля вовлеченного в переработку техногенного сырья. В то же время проходит реконструкция предприятий, и традиционные процессы получения медных штейнов — шахтную и отражательную плавку — заменяют современными автогенными процессами.

Накопленный многолетний опыт ведения пиритной шахтной плавки, отражательной плавки сырой и обожженной шихты, электроплавки остается достоянием истории. Инженеру-металлургу необходимо уметь рассчитывать основные операции технологического процесса в условиях меняющегося состава сырья, выбирать оптимальные режимы ведения процесса, прогнозировать состав получаемых продуктов. Несмотря на изменение условий, основные принципы и закономерности металлургических расчетов остаются неизменными и базируются на огромном практическом опыте работы медеплавильных предприятий. Основам расчетов шихты, материального и теплового балансов плавки, конвертирования и огневого рафинирования медного сырья посвящено данное пособие.

---

# 1. Расчет шихты

---

## 1.1. Порядок расчета

---

**В** качестве исходного сырья для плавки на штейн используется большое количество материалов, имеющих различный состав: медные концентраты разных обогатительных фабрик; медный концентрат, полученный при переработке медеплавильных и конвертерных шлаков; оборотные пыли; клинкер; лом и отходы; руды; флюсы и т. д. Все эти материалы образуют шихту.

Материалы в печь грузят в определенных соотношениях согласно предварительному технологическому расчету. Шихтовый замес рассчитывается в 2 этапа:

1-й этап — шихта без флюсов. На данном этапе рассчитывают составы медьсодержащих материалов и общий состав шихты без добавления флюсов. Такой расчет позволяет определить количество шлакообразующих минералов и соединений, которые присутствуют в медьсодержащем сырье;

2-й этап — после предварительных расчетов штейна, пыли и первичного шлака, рассчитывают то количество флюсов, которое необходимо добавить в исходную шихту для получения шлака заданного состава, и получают окончательный состав шихты с флюсами.

## 1.2. Расчет состава шихты без флюсов

---

Расчет шихты проводим на 100 кг сухой массы. Для расчета необходимы данные по химическому, фазовому и минералогическому составам отдельных компонентов шихты.

Химический состав компонентов шихты приведен в табл. 1.1. Данные фазового и минералогического состава приводятся по ходу ведения расчета.

Таблица 1.1

**Химический состав материалов**

Компонент шихты	Содержание, %										
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Пр.	ВСЕ-ГО
Концентрат медный	19,0	1,5	0,5	30,2	38,0	1,0	1,0	1,0	—	7,8	100,0
Концентрат золотосодержащий	4,0	0,2	0,5	25,0	20,0	34,0	1,0	1,0	—	14,3	100,0
Пыль циклонов	15,0	28,0	5,0	15	5,3	9,0	2,0	2,0	—	18,7	100,0
Концентрат шлаковый	23,0	2,0	0,5	38,0	18,2	8,1	1,0	1,8	0,5	6,9	100,0

В соответствии с технологическими параметрами, результатами научно-исследовательских работ, практической работой предприятий доля указанных компонентов в составе шихты приведена в табл. 1.2.

Таблица 1.2

**Доля компонентов в шихте**

Вид материала	Компонент шихты	Доля в шихте, %
Первичное сульфидное сырье	Концентрат медный	40,00
Первичное сырье	Концентрат золотосодержащий	25,00
Оборотный материал	Пыль циклонов	10,00
Техногенное сырье	Концентрат шлаковый	25,00
ИТОГО		100,00

Для выполнения расчетов необходимы атомные массы элементов и соединений. Массы элементов находим по таблице химических элементов Д. И. Менделеева, массы соединений рассчитываем по массе отдельных составляющих (табл. 1.3).

Таблица 1.3

**Массы химических элементов и их соединений**

Элемент	<i>M</i> , г/моль	Соединение	<i>M</i> , г/моль	Соединение	<i>M</i> , г/моль
Cu	63,5	CuFeS <sub>2</sub>	183,3	FeS	87,8
S	32,1	CuS	95,5	ZnO	81,4
Fe	55,8	FeS <sub>2</sub>	119,8	PbO	223,2
Zn	65,4	ZnS	97,4	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	231,4
Pb	207,2	PbS	239,2	2FeO·SiO <sub>2</sub>	203,6
O	16	Cu <sub>2</sub> S	159	FeO	71,8
Si	28,1	SiO <sub>2</sub>	60	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159,6
Ca	40,1	CaO	56	CO <sub>2</sub>	44
C	12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101,8	SO <sub>2</sub>	64

**1.3. Расчет рационального состава медного концентрата**

Расчет рационального состава ведем на 100 кг сухого концентрата. По данным фазового анализа принимаем, что основные металлы в сульфидном медном концентрате находятся в виде следующих минералов: CuFeS<sub>2</sub>, Cu<sub>2</sub>S, CuS, PbS, FeS<sub>2</sub>, ZnS. Пустая порода представлена SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, прочими составляющими.

Для расчета рационального состава необходимо составить таблицу, в которой будут учтены все химические соединения и элементы, входящие в состав концентрата (табл. 1.4). Заполняемые ячейки обозначены знаком «х». Данные, вносимые в таблицу, суммируем по строкам и столбцам. Поскольку расчет ведем на 100 кг, сумма чисел по столбцу «Итого» и строке «Всего» должна дать число 100 (ячейка «XX»).

Таблица 1.4

**Предварительные данные о рациональном составе медного концентрата**

Соединения	Элементы										ИТОГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Прочие	
CuFeS <sub>2</sub>	х	—	—	х	х	—	—	—	—	—	х
Cu <sub>2</sub> S	х	—	—	—	х	—	—	—	—	—	х
CuS	х	—	—	—	х	—	—	—	—	—	х
ZnS	—	х	—	—	х	—	—	—	—	—	х



Окончание табл. 1.4

Соединения	Элементы										ИТОГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Прочие	
PbS	—	—	x	—	x	—	—	—	—	—	x
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	x	x	—	—	—	—	—	x
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	x	—	—	—	—	x
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	x	—	—	—	x
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	x	—	x	x
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	x	x
ВСЕГО	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	XX

После того как таблица будет заполнена, столбец «Итого» покажет массу отдельных минералов в концентрате. Поскольку расчет ведем на 100 кг сухого материала (100 кг — это 100 % исходного концентрата), эти цифры совпадут с содержанием отдельных минералов в концентрате. Данные, полученные в строке «Всего», должны совпадать с данными табл. 1.1 — это количество каждого элемента в концентрате. При расчете на 100 кг они совпадают с данными химического анализа.

Если расчет ведется не на 100 кг, для получения процентного содержания соединений и элементов требуется добавление дополнительного столбца и строки и дополнительный пересчет полученных значений в проценты.

Если расчет выполнен правильно, но полученный результат не совпадает с данными химического анализа, необходимо провести дополнительные анализы (химические, минералогические, фазовые) данного материала.

Данные в табл. 1.4 будем заносить по ходу выполнения расчетов.

Соединения SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в процессе плавки не разлагаются на составляющие и переходят в шлак в виде оксидов либо образуют силикаты, поэтому при расчете рационального состава эти минералы не делят на элементы, а заносят в соответствующие графы в виде единого соединения. Содержание SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в медном концентрате по 1 % (см. табл. 1.1). Поэтому масса каждого соединения в 100 кг концентрата составит 1 кг.

Заносим данные в соответствующие ячейки табл. 1.4.

Оксид кальция CaO входит в состав минерала кальцита CaCO<sub>3</sub>. При плавке происходит реакция разложения кальцита



Содержание  $\text{CaO}$  в медном концентрате — 1 %, соответственно масса  $\text{CaO}$  в 100 кг концентрата будет 1 кг, тогда масса  $\text{CO}_2$  составит

$$\text{CaCO}_3 = \underset{1}{\overset{56}{\text{CaO}}} + \underset{x}{\overset{44}{\text{CO}_2}}$$

$$x = 1,0 \cdot 44/56 = 0,79 \text{ кг},$$

где 56 — атомная масса оксида кальция, г/моль (см. табл. 1.3);

44 — атомная масса оксида углерода, г/моль (см. табл. 1.3).

Общая масса кальцита  $\text{CaCO}_3$  составит

$$1,0 + 0,79 = 1,79 \text{ кг}.$$

Количество  $\text{CO}_2$  учтем в графе «Прочие».

Заносим данные в соответствующие ячейки табл. 1.4.

По результатам фазового анализа принимаем распределение меди по минералам медного концентрата, %:  $\text{CuFeS}_2$  — 58;  $\text{Cu}_2\text{S}$  — 32;  $\text{CuS}$  — 10.

Содержание меди в медном концентрате — 19 %, следовательно, масса меди в 100 кг концентрата составит 19 кг.

Рассчитываем массы отдельных элементов в халькопирите  $\text{CuFeS}_2$

$$\text{Cu} : 19,0 \cdot 58/100 = 11,02 \text{ кг},$$

где 19 — масса меди в 100 кг концентрата, кг;

58 — доля меди, приходящаяся на халькопирит, %.

Железо и сера в  $\text{CuFeS}_2$ : в халькопирите на 63,5 г/моль меди приходится 55,8 г/моль железа и  $2 \cdot 32,1 = 64,2$  г/моль серы

$$\begin{array}{ccc} 11,02 & x & y \\ \text{Cu} & \text{Fe} & \text{S}_2 \\ 63,5 & 55,8 & 32,1 \cdot 2 \end{array}$$

тогда на 11,02 кг меди придется железа

$$x = 11,02 \cdot 55,8/63,5 = 9,68 \text{ кг},$$

где 11,02 — масса меди в халькопирите, кг;

55,8 — атомная масса железа, г/моль (см. табл. 1.3);

63,5 — атомная масса меди, г/моль (см. табл. 1.3).

Аналогично расчету выше рассчитываем массу серы в  $\text{CuFeS}_2$

$$y = 11,02 \cdot (2 \cdot 32,1)/63,5 = 11,14 \text{ кг},$$

где 32,1 — атомная масса серы, г/моль (см. табл. 1.3).

Масса  $\text{CuFeS}_2$  составит

$$11,02 + 9,68 + 11,14 = 31,85 \text{ кг.}$$

Заносим полученные данные в табл. 1.4.

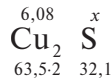
Аналогично расчету выше рассчитываем массы элементов в халькозине  $\text{Cu}_2\text{S}$ :

Cu в  $\text{Cu}_2\text{S}$

$$19 \cdot 32/100 = 6,08 \text{ кг,}$$

где 19 — масса меди в 100 кг концентрата, кг;

32 — доля меди, приходящаяся на халькозин, %.



Масса серы в  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$6,08 \cdot 32,1/(63,5 \cdot 2) = 1,54 \text{ кг,}$$

где 32,1 — атомная масса серы, г/моль (см. табл. 1.3);

63,5 — атомная масса меди, г/моль (см. табл. 1.3).

Масса  $\text{Cu}_2\text{S}$

$$6,08 + 1,54 = 7,62 \text{ кг.}$$

Рассчитываем массы элементов в ковеллине  $\text{CuS}$ .

Масса Cu в  $\text{CuS}$

$$19 \cdot 10/100 = 1,9 \text{ кг}$$

где 19 — масса меди в 100 кг концентрата, кг;

10 — доля меди, приходящаяся на ковеллин, %.

Масса серы в  $\text{CuS}$

$$1,9 \cdot 32,1/64,12 = 0,96 \text{ кг.}$$

Общая масса  $\text{CuS}$

$$1,9 + 0,96 = 2,86 \text{ кг.}$$

Заносим полученные данные в табл. 1.4.

Сфалерит  $\text{ZnS}$  — весь цинк, содержащийся в концентрате, находится в сфалерите. Содержание цинка в концентрате — 1,5 %, масса цинка в 100 кг концентрата — 1,5 кг. В сфалерите на 65,4 г/моль цинка приходится 32,1 г/моль серы, тогда на 1,5 кг цинка придется серы

$$1,5 \cdot 32,1/65,4 = 0,74 \text{ кг.}$$

Общая масса ZnS составит

$$1,5 + 0,74 = 2,24 \text{ кг.}$$

Галенит PbS — весь свинец, содержащийся в концентрате, находится в галените. Масса свинца в 100 кг концентрата 0,5 кг. В галените на 207,2 г/моль свинца приходится 32,1 г/моль серы, тогда на 0,5 кг свинца придется серы

$$0,5 \cdot 32,1/207,2 = 0,08 \text{ кг.}$$

Общая масса PbS составит

$$0,5 + 0,08 = 0,58 \text{ кг.}$$

Железо в медном концентрате представлено двумя минералами — халькопиритом  $\text{CuFeS}_2$  и пиритом  $\text{FeS}_2$ . Содержание железа в медном концентрате — 30,2%, масса железа в 100 кг концентрата составит 30,2 кг. Масса железа в халькопирите по расчету составила 9,68 кг. На долю пирита осталось железа

$$30,2 - 9,68 = 20,52 \text{ кг.}$$

С этим количеством железа будет связано серы

$$20,52 \cdot (2 \cdot 32,1)/55,8 = 23,60 \text{ кг.}$$

Масса  $\text{FeS}_2$  составит

$$20,52 + 23,60 = 44,12 \text{ кг.}$$

Все полученные результаты заносим в табл. 1.4 и получаем таблицу рационального состава медного концентрата. Массу прочих компонентов шихты находим как разность между 100 кг и массой всех учтенных компонентов (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Рациональный состав медного концентрата, %

Соединения	Элементы									ИТОГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Прочие	
$\text{CuFeS}_2$	11,02	—	—	9,68	11,14	—	—	—	—	31,85
$\text{Cu}_2\text{S}$	6,08	—	—	—	1,54	—	—	—	—	7,62
$\text{CuS}$	1,90	—	—	—	0,96	—	—	—	—	2,86

Окончание табл. 1.5

Соединения	Элементы									ИТОГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Прочие	
ZnS	—	1,50	—	—	0,74	—	—	—	—	2,24
PbS	—	—	0,50	—	0,08	—	—	—	—	0,58
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	20,52	23,60	—	—	—	—	44,12
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	1,00	—	—	—	1,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	1,00	—	—	1,00
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	1,00	0,79	1,79
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	6,96	6,96
ВСЕГО	19,00	1,50	0,50	30,20	38,06	1,00	1,00	1,00	7,75	100,00

Данные расчета совпали с результатами химического анализа.

#### 1.4. Расчет рационального состава золотосодержащего концентрата

Золотосодержащие концентраты поступают с различных обогатительных фабрик, содержание золота и серебра в таких концентратах составляет в среднем 30 и 700 г/т соответственно. Ввиду такого низкого содержания, эти элементы не учитывают при расчете рационального состава. Балансы по драгоценным металлам составляются отдельно.

Химический состав золотосодержащего концентрата приведен в табл. 1.1. Принимаем следующие минералогические формы металлов в этом виде сырья: Cu<sub>2</sub>S, Cu<sub>2</sub>O, PbS, FeS<sub>2</sub>, ZnS, CaCO<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Распределение меди в концентрате по соединениям, %: Cu<sub>2</sub>S — 50; Cu<sub>2</sub>O — 50.

Составляем соответствующую таблицу и начинаем расчет. Расчет ведем на 100 кг золотосодержащего концентрата.

Содержание меди в золотосодержащем концентрате — 4 %, следовательно, масса меди в 100 кг концентрата составит 4 кг.

Масса меди в халькозине Cu<sub>2</sub>S составит

$$4 \cdot 50/100 = 2 \text{ кг},$$

где 4 — масса меди в концентрате, кг;

50 — доля меди, приходящаяся на халькозин, %.

Масса серы в  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$2 \cdot 32,1 / (2 \cdot 63,5) = 0,51 \text{ кг},$$

где 32,1 — атомная масса серы, г/моль (см. табл. 1.3).

Общая масса  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$2 + 0,51 = 2,51 \text{ кг}.$$

Аналогично расчету выше рассчитываем массы меди и кислорода в куприте  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Получаем массу меди в  $\text{Cu}_2\text{O}$  2 кг, кислорода 0,25 кг, общую массу куприта 2,25 кг.

Сфалерит  $\text{ZnS}$  и галенит  $\text{PbS}$  рассчитываем аналогично расчету этих соединений для медного концентрата с учетом того, что содержание цинка в золотосодержащем концентрате — 0,2 %, а свинца — 0,5 % (см. табл. 1.1).

Получаем массу цинка в  $\text{ZnS}$  0,2 кг, массу серы в  $\text{ZnS}$  0,1 кг, общая масса сфалерита составит 0,3 кг.

Масса свинца в галените составит 0,1 кг, серы 0,08 кг, общая масса галенита составит 0,58 кг.

Последний неучтенный сульфидный минерал в золотосодержащем концентрате — это пирит  $\text{FeS}_2$ . Содержание серы в концентрате — 20 %, масса серы в 100 кг концентрата — 20 кг. На долю  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{PbS}$  и  $\text{ZnS}$  приходится серы

$$0,51 + 0,10 + 0,08 = 0,69 \text{ кг}.$$

На долю пирита остается серы

$$20,0 - 0,69 = 19,31 \text{ кг}.$$

В таком случае масса железа в  $\text{FeS}_2$  составит

$$19,31 \cdot 55,8 / (2 \cdot 32,1) = 16,79 \text{ кг}.$$

Общая масса пирита  $\text{FeS}_2$  составит

$$19,31 + 16,79 = 36,10 \text{ кг}.$$

Содержание железа в золотосодержащем концентрате — 25 % (см. табл. 1.1), масса железа в 100 кг концентрата составит 25 кг.

На долю пирита приходится 16,79 кг железа, тогда на долю оксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  придется железа

$$25,0 - 16,79 = 8,21 \text{ кг.}$$

С этим количеством железа будет связано кислорода

$$8,21 \cdot (3 \cdot 16) / (2 \cdot 55,8) = 3,53 \text{ кг.}$$

Общая масса  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  составит

$$8,21 + 3,53 = 11,74 \text{ кг.}$$

Массы  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  и прочих рассчитываем аналогично расчету медного концентрата. Масса  $\text{SiO}_2$  составит 34 кг,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 1 кг и  $\text{CaCO}_3$  — 1,79 кг (в т. ч. 1 кг  $\text{CaO}$ , 0,79 кг  $\text{CO}_2$ ).  $\text{CO}_2$  заносим в графу «Прочие».

Рациональный состав золотосодержащего концентрата приведен в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Рациональный состав золотосодержащего концентрата, %

Соединения	Элементы										ИТОГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	O	Пр.	
$\text{Cu}_2\text{S}$	2,00	—	—	—	0,51	—	—	—	—	—	2,51
$\text{Cu}_2\text{O}$	2,00	—	—	—	—	—	—	—	0,25	—	2,25
$\text{ZnS}$	—	0,20	—	—	0,10	—	—	—	—	—	0,30
$\text{PbS}$	—	—	0,50	—	0,08	—	—	—	—	—	0,58
$\text{FeS}_2$	—	—	—	16,79	19,31	—	—	—	—	—	36,10
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	—	—	—	8,21	—	—	—	—	3,53	—	11,74
$\text{Al}_2\text{O}_3$	—	—	—	—	—	—	1,00	—	—	—	1,00
$\text{SiO}_2$	—	—	—	—	—	34,00	—	—	—	—	34,00
$\text{CaCO}_3$	—	—	—	—	—	—	—	1,00	—	0,79	1,79
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,89	10,91
ВСЕГО	4,00	0,20	0,50	25,00	20,00	34,00	1,00	1,00	3,78	11,68	101,1

Данные расчета совпали с результатами химического анализа, но за счет выделения кислорода в отдельную составляющую, изменилось количество прочих элементов — по данным химического анализа содержание прочих компонентов в золотосодержащем концентрате составляло 14,30 %. Результат расчета скорректировал это значение.

### 1.5. Расчет рационального состава пыли циклонов шахтных печей

Пыль, уловленная в циклонах и возвращаемая в процесс, представляет собой мельчайшие частицы шихты, вынесенные из печи потоком отходящих газов. Кроме того, в грубой пыли частично содержатся сконденсировавшиеся возгоны летучих компонентов шихты, в первую очередь цинка.

Химический состав пыли приведен в табл. 1.1.

По данным анализа принимаем следующие соединения металлов в пыли:  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Распределение меди в пыли, %:  $\text{Cu}_2\text{O}$  — 70;  $\text{Cu}_2\text{S}$  — 30.

Распределение цинка, %:  $\text{ZnO}$  — 70;  $\text{ZnS}$  — 30.

Расчет ведем на 100 кг пыли.

Содержание меди в пыли — 15 % (см. табл. 1.1), соответственно масса меди в 100 кг пыли составляет 15 кг.

Масса меди в  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$15 \cdot 30/100 = 4,5 \text{ кг},$$

где 15 — масса меди в пыли, кг;

30 — доля меди, приходящаяся на  $\text{Cu}_2\text{S}$ , %.

Масса серы в  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$4,5 \cdot 32,1/(2 \cdot 63,5) = 1,14 \text{ кг},$$

где 32,1 — атомная масса серы, г/моль (см. табл. 1.3).

Общая масса  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$4,5 + 1,14 = 5,64 \text{ кг}.$$

Аналогично расчету выше, рассчитываем массы меди и кислорода в  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Получаем массу меди в  $\text{Cu}_2\text{O}$  10,5 кг, кислорода 1,32 кг, общую массу  $\text{Cu}_2\text{O}$  11,82 кг.

Аналогично расчету для медного концентрата, рассчитываем  $\text{PbO}$  с учетом того, что содержание свинца в пыли 5 % (см. табл. 1.1). Получаем массу свинца в пыли 5 кг, кислорода 0,39 кг, общая масса  $\text{PbO}$  составит 5,39 кг.



В пыли два соединения цинка —  $\text{ZnS}$  и  $\text{ZnO}$ . Содержание цинка в пыли — 28 %, в 100 кг пыли масса цинка составит 28 кг. На долю сульфидного цинка придется

$$28 \cdot 30/100 = 8,4 \text{ кг},$$

где 30 — доля цинка, приходящаяся на  $\text{ZnS}$ , %.

В  $\text{ZnS}$  на 65,4 г/моль цинка приходится 32,1 г/моль серы, тогда на 8,4 кг цинка придется серы

$$8,4 \cdot 32,1/65,4 = 4,12 \text{ кг}.$$

Общая масса  $\text{ZnS}$  составит

$$8,4 + 4,12 = 12,52 \text{ кг}.$$

На  $\text{ZnO}$  остается цинка

$$28,0 - 8,4 = 19,6 \text{ кг}.$$

В  $\text{ZnO}$  на 65,4 г/моль цинка приходится 16 г/моль кислорода, тогда на 19,6 кг цинка придется кислорода

$$19,6 \cdot 16/65,4 = 4,8 \text{ кг}.$$

Общая масса  $\text{ZnO}$  составит

$$19,6 + 4,8 = 24,4 \text{ кг}.$$

Содержание железа в пыли 15 % (см. табл. 1.1), масса железа в 100 кг пыли составит 15 кг. Все железо находится в форме оксида  $\text{FeO}$ . С этим количеством железа будет связано кислорода

$$15 \cdot 16/55,8 = 4,3 \text{ кг}.$$

Общая масса  $\text{FeO}$  составит

$$15 + 4,3 = 19,3 \text{ кг}.$$

Массы  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  и прочих рассчитывают аналогично расчету медного концентрата. Масса  $\text{SiO}_2$  составит 9 кг,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 2 кг и  $\text{CaCO}_3$  — 3,57 кг (в т. ч. 2 кг  $\text{CaO}$ , 1,57 кг  $\text{CO}_2$ ). Заносим  $\text{CO}_2$  в графу «Прочие». Рациональный состав пыли приведен в табл. 1.7.

Таблица 1.7

**Рациональный состав пыли циклонов**

Соединения	Элементы										ИТОГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
Cu <sub>2</sub> S	4,50	—	—	—	1,14	—	—	—	—	—	5,64
Cu <sub>2</sub> O	10,50	—	—	—	—	—	—	—	1,32	—	11,82
ZnS	—	8,40	—	—	4,12	—	—	—	—	—	12,52
ZnO	—	19,60	—	—	—	—	—	—	4,80	—	24,40
PbO	—	—	5,00	—	—	—	—	—	0,39	—	5,39
FeO	—	—	—	15,00	—	—	—	—	4,30	—	19,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	2,00	—	—	—	2,00
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	9,00	—	—	—	—	9,00
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	2,00	—	1,57	3,57
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,36	6,36
ВСЕГО	15,00	28,00	5,00	15,00	5,26	9,00	2,00	2,00	10,81	7,93	100,00

Данные расчета совпали с результатами химического анализа, но за счет выделения кислорода в отдельную составляющую, изменилось количество прочих элементов.

### 1.6. Расчет рационального состава медного концентрата от обогащения шлаков

Плавильные и конвертерные шлаки содержат медь в количестве, равном или даже превышающем содержание меди в руде (0,9–1,5 % меди содержат плавильные шлаки, 3–5 % — конвертерные). Практически все медьсодержащие шлаки перерабатывают методом флотации с получением шлаковых концентратов. Эти концентраты поступают на плавку совместно с рудными концентратами. Поскольку шлаки являются продуктом переработки сырья, претерпевшего в результате плавки существенные изменения, их минералогический состав существенно отличается от состава рудного концентрата.

Химический состав шлакового концентрата приведен в табл. 1.1. Принимаем следующие соединения металлов в шлаковом концентрате: Cu<sub>2</sub>O, Cu<sub>2</sub>S, ZnS, 2ZnO·SiO<sub>2</sub>, ZnO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2FeO·SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, PbO, FeS, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO.

Распределение меди в концентрате по соединениям; %:  $\text{Cu}_2\text{S}$  — 90,  $\text{Cu}_2\text{O}$  — 10.

Распределение цинка в концентрате по соединениям, %:  $\text{ZnS}$  — 79;  $2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$  — 15;  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  — 6.

Расчет ведем на 100 кг концентрата.

Содержание меди в шлаковом концентрате — 23 % (см. табл. 1.1), соответственно масса меди в 100 кг шлакового концентрата составляет 23 кг.

Масса меди в  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$23 \cdot 90/100 = 20,7 \text{ кг},$$

где 23 — масса меди в концентрате, кг;

90 — доля меди, приходящаяся на  $\text{Cu}_2\text{S}$ , %.

Масса серы в  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$20,7 \cdot 32,1/(2 \cdot 63,5) = 5,23 \text{ кг},$$

где 32,1 — атомная масса серы, г/моль (см. табл. 1.3).

Общая масса  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$20,7 + 5,23 = 25,93 \text{ кг}.$$

Аналогично расчету выше рассчитываем массы меди и кислорода в  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Получаем массу меди в  $\text{Cu}_2\text{O}$  2,3 кг, кислорода — 0,29 кг, общую массу  $\text{Cu}_2\text{O}$  — 2,59 кг.

Рассчитываем  $\text{PbO}$  аналогично расчету для медного концентрата с учетом того, что содержание свинца в шлаковом концентрате — 0,5 % (см. табл. 1.1). Получаем массу свинца в шлаковом концентрате 0,5 кг, кислорода в  $\text{PbO}$  — 0,04 кг, общую массу  $\text{PbO}$  — 0,54 кг.

Массы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CaCO}_3$  рассчитываем аналогично расчету медного концентрата. Масса  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 1,5 кг,  $\text{MgO}$  — 0,5 кг и  $\text{CaCO}_3$  — 2 кг (в т. ч. 2 кг  $\text{CaO}$ , 1,57 кг  $\text{CO}_2$ ).  $\text{CO}_2$  заносим в графу «Прочие».

В шлаковом концентрате три соединения цинка — сульфид  $\text{ZnS}$ ; силикат  $2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$  и феррит  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Содержание цинка в шлаковом концентрате 2 %, в 100 кг концентрата масса цинка составит 2 кг.

Согласно распределению цинка в концентрате по соединениям, на долю сульфидного цинка придется

$$2 \cdot 79/100 = 1,58 \text{ кг},$$

где 79 — доля цинка, приходящаяся на  $\text{ZnS}$ , %.

В  $\text{ZnS}$  на 65,4 г/моль цинка приходится 32,1 г/моль серы, тогда на 1,58 кг цинка придется серы

$$1,58 \cdot 32,1/65,4 = 0,78 \text{ кг.}$$

Общая масса  $\text{ZnS}$  составит

$$1,58 + 0,78 = 2,36 \text{ кг.}$$

На силикат цинка  $2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$  приходится цинка

$$2 \cdot 15/100 = 0,3 \text{ кг.}$$

В  $2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$  на  $2 \cdot 65,4$  г/моль цинка приходится  $2 \cdot 16$  г/моль кислорода, тогда на 0,3 кг цинка придется кислорода

$$0,3 \cdot 16/65,4 = 0,07 \text{ кг.}$$

Масса  $\text{SiO}_2$  составит

$$\begin{array}{c} 2 \cdot 65,4 \quad 60 \\ 2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2 \\ 0,3 \quad x \end{array}$$

$$x = 0,3 \cdot 60/(2 \cdot 65,4) = 0,14 \text{ кг,}$$

где 60 — атомная масса  $\text{SiO}_2$ , г/моль (см. табл. 1.3).

Общая масса  $2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$  составит

$$0,3 + 0,14 + 0,07 = 0,51 \text{ кг.}$$

На феррит цинка  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  приходится цинка

$$2 \cdot 6/100 = 0,12 \text{ кг.}$$

В  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  на 65,4 г/моль цинка приходится  $4 \cdot 16$  г/моль кислорода, тогда на 0,12 кг цинка придется кислорода

$$0,12 \cdot (4 \cdot 16)/65,4 = 0,12 \text{ кг.}$$

Масса Fe в феррите составит

$$\begin{array}{c} 65,4 \quad 55,8 \cdot 2 \\ \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \\ 0,12 \quad y \end{array}$$

$$y = 0,12 \cdot (55,8 \cdot 2)/65,4 = 0,2 \text{ кг,}$$

где 55,8 — атомная масса железа, г/моль (см. табл. 1.3).

Общая масса феррита цинка  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

$$0,12 + 0,12 + 0,2 = 0,44 \text{ кг.}$$

В шлаковом концентрате железо содержится в четырех соединениях:  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeS}$ . Содержание железа в концентрате — 38 % (см. табл. 1.1), масса железа в 100 кг концентрата — 38 кг. Масса железа в феррите  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  составила 0,2 кг.

Рассчитываем массу железа в сульфиде  $\text{FeS}$ . Поскольку в шлаковом концентрате только 3 соединения с серой —  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{ZnS}$  и  $\text{FeS}$ , то вся сера распределяется между ними. Содержание серы в шлаковом концентрате 18,25 %, масса серы в 100 кг концентрата 18,25 кг. Массу серы в  $\text{Cu}_2\text{S}$  и  $\text{ZnS}$  нашли ранее: в  $\text{Cu}_2\text{S}$  серы 5,23 кг, в  $\text{ZnS}$  — 0,78 кг.

На  $\text{FeS}$  остается серы

$$18,25 - 5,23 - 0,78 = 12,24 \text{ кг.}$$

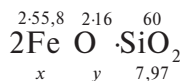
С этим количеством серы будет связано железа

$$55,8 \cdot 12,24 / 32,1 = 21,28 \text{ кг.}$$

Определяем количество железа в силикате  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ . Содержание  $\text{SiO}_2$  в концентрате — 8,11 %, масса кремнезема в 100 кг концентрата — 8,11 кг. Оксид кремния связывает в силикаты цинк и железо. Масса  $\text{SiO}_2$  в силикате цинка по расчету составила 0,14 кг, тогда на долю силиката железа останется

$$8,11 - 0,14 = 7,97 \text{ кг } \text{SiO}_2.$$

С этим количеством оксида кремния будет связано железа и кислорода



Масса железа в этом соединении составит

$$(2 \cdot 55,8) \cdot 7,97 / 60 = 14,32 \text{ кг;}$$

масса кислорода составит

$$(2 \cdot 16) \cdot 7,97 / 60 = 4,25 \text{ кг.}$$

Общая масса силиката железа  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  будет

$$7,97 + 14,32 + 4,25 = 27,04 \text{ кг.}$$

Остальное железо в шлаковом концентрате находится в виде магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Масса железа в магнетите составит

$$38 - 0,2 - 14,82 - 21,28 = 1,7 \text{ кг.}$$

С этим количеством железа связано кислорода

$$1,7 \cdot (16 \cdot 4) / (55,8 \cdot 3) = 0,65 \text{ кг.}$$

Рациональный состав шлакового концентрата приведен в табл. 1.8.

Таблица 1.8

**Рациональный состав медного концентрата  
от обогащения шлаков**

Соединения	Элементы										ИТОГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
Cu <sub>2</sub> S	20,70	—	—	—	5,23	—	—	—	—	—	25,93
Cu <sub>2</sub> O	2,30	—	—	—	—	—	—	—	0,29	—	2,59
ZnS	—	1,58	—	—	0,78	—	—	—	—	—	2,36
2ZnO·SiO <sub>2</sub>	—	0,30	—	—	—	0,14	—	—	0,07	—	0,51
PbO	—	—	0,50	—	—	—	—	—	0,04	—	0,54
ZnO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,12	—	0,20	—	—	—	—	0,12	—	0,44
2FeO·SiO <sub>2</sub>	—	—	—	14,82	—	7,97	—	—	4,25	—	27,04
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	1,70	—	—	—	—	0,65	—	2,34
FeS	—	—	—	21,28	12,24	—	—	—	—	—	33,52
MgO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,50	0,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	1,00	—	—	—	1,00
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	1,80	—	1,41	3,21
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,01	0,01
ВСЕГО	23,00	2,00	0,50	38,00	18,25	8,11	1,00	1,80	5,42	1,92	100,00

Данные расчета по основным компонентам совпали с результатами химического анализа, но за счет отнесения кислорода в отдельную графу, изменилось количество прочих элементов: по данным химического анализа содержание прочих компонентов в шлаковом концентрате составляло 6,9%; расчетное значение — 1,92%.

## 1.7. Рациональный состав шихты без флюсов

По результатам проведенных расчетов и в соответствии с табл. 1.1 и 1.2 рассчитаем химический и рациональный состав шихты без добавления флюсов. Необходимо учесть все химические элементы и все соединения, входящие в состав шихтовых материалов.

Рассчитаем массу меди в шихте.

Медь, которая приходит с концентратом медным,

$$19 \cdot 40/100 = 7,6 \text{ кг},$$

где 19 — масса меди в медном концентрате, кг (см. табл. 1.5);

40 — доля медного концентрата в шихте, % (см. табл. 1.2).

Медь, которая приходит с концентратом золотосодержащим

$$4 \cdot 25/100 = 1,0 \text{ кг},$$

где 4 — масса меди в золотосодержащем концентрате, кг (см. табл. 1.6);

25 — доля золотосодержащего концентрата в шихте, % (см. табл. 1.2).

Медь, которая приходит с пылью циклонов,

$$15 \cdot 10/100 = 1,5 \text{ кг},$$

где 15 — масса меди в пыли циклонов, кг (см. табл. 1.7);

10 — доля пыли циклонов в шихте, % (см. табл. 1.2).

Медь, которая приходит концентратом медным от обогащения шлаков,

$$23 \cdot 25/100 = 5,75 \text{ кг},$$

где 23 — масса меди в концентрате от обогащения шлаков, кг (см. табл. 1.8);

25 — доля концентрата от обогащения шлаков в шихте, % (см. табл. 1.2).

Итого масса меди в шихте

$$7,6 + 1,0 + 1,5 + 5,75 = 15,85 \text{ кг}.$$

Массы остальных компонентов рассчитываем аналогично вышеприведенному расчету. Полученные результаты заносим в табл. 1.9.

Расчет вели на 100 кг шихты (100 кг — 100 % шихты), таким образом, в строке «Итого» табл. 1.9 получили не только массу отдельных элементов в шихте, но и содержание этих элементов в шихте (табл. 1.10).

Таблица 1.10

**Химический состав шихты**

Компонент	Химическая формула	Содержание в шихте, %	Компонент	Химическая формула	Содержание в шихте, %
Медь	Cu	15,85	Кремнезем	SiO <sub>2</sub>	11,83
Цинк	Zn	3,95	Глинозем	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,10
Свинец	Pb	0,95	Оксид магния	CaO	1,30
Железо	Fe	29,33	Оксид кальция	MgO	0,12
Сера	S	25,28	Прочие	—	10,29

На основании табл. 1.5–1.8 рассчитаем фазовый состав шихты.

Количество отдельных соединений рассчитываем следующим образом.

Халькопирит входит в состав только концентрата медного. По данным табл. 1.5 масса халькопирита CuFeS<sub>2</sub> в 100 кг медного концентрата — 31,85 кг, соответственно с медным концентратом в шихту придет халькопирита

$$31,85 \cdot 40/100 = 12,74 \text{ кг},$$

где 40 — доля медного концентрата в шихте, % (см. табл. 1.2).

Сульфид меди Cu<sub>2</sub>S входит в состав всех компонентов шихты; рассчитаем массу Cu<sub>2</sub>S, приходящую с каждым компонентом.

Cu<sub>2</sub>S, приходящий с медным концентратом,

$$7,62 \cdot 40/100 = 3,05 \text{ кг},$$

где 7,62 — масса Cu<sub>2</sub>S в 100 кг медного концентрата, кг (см. табл. 1.5);

40 — доля медного концентрата в шихте, % (см. табл. 1.2).

Cu<sub>2</sub>S, приходящий с золотосодержащим концентратом,

$$2,51 \cdot 25/100 = 0,63 \text{ кг},$$

где 2,51 — масса Cu<sub>2</sub>S в 100 кг концентрата золотосодержащего, кг (см. табл. 1.6);

25 — доля концентрата золотосодержащего в шихте, % (см. табл. 1.2).



Таблица 1.9

Состав шихты

Материал	Доля в шихте, %	Cu		Zn		Pb		Fe		S		SiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		CaO		MgO		Проч.	
		%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
Концентрат медный	40,00	19,00	7,60	1,50	0,60	0,50	0,20	30,20	12,08	38,00	15,20	1,00	0,4	1,00	0,40	1,00	0,40	—	—	7,80	3,12
Концентрат золотосодержащий	25,00	4,00	1,00	0,20	0,05	0,50	0,13	25,00	6,25	20,00	5,00	34,00	8,5	1,00	0,25	1,00	0,25	—	—	14,30	3,57
Пыль циклонов	10,00	15,00	1,50	28,00	2,80	5,00	0,50	15,00	1,50	5,30	0,53	9,00	0,9	2,00	0,20	2,00	0,20	—	—	18,70	1,87
Концентрат шлаковый	25,00	23,00	5,75	2,00	0,50	0,50	0,13	38,00	9,50	18,20	4,55	8.10	2,03	1,00	0,25	1,80	0,45	0,50	0,12	6,90	1,725
ИТОГО	100,00	—	15,85	—	3,95	—	0,95	—	29,33	—	25,28	—	11,83	—	1,10	—	1,30	—	0,12	—	10,29

$\text{Cu}_2\text{S}$ , приходящий с пылью циклонов,

$$5,64 \cdot 10/100 = 0,56 \text{ кг},$$

где 5,64 — масса  $\text{Cu}_2\text{S}$  в 100 кг пыли циклонной, кг (см. табл. 1.7);

10 — доля пыли циклонной в шихте, % (см. табл. 1.2).

$\text{Cu}_2\text{S}$ , приходящий со шлаковым концентратом,

$$25,93 \cdot 25/100 = 6,48 \text{ кг},$$

где 25,93 — масса  $\text{Cu}_2\text{S}$  в 100 кг шлаковом концентрате, кг (см. табл. 1.8);

25 — доля шлакового концентрата в шихте, % (см. табл. 1.2).

Итого масса  $\text{Cu}_2\text{S}$  в шихте

$$3,05 + 0,63 + 0,56 + 6,48 = 10,72 \text{ кг}.$$

Массы остальных соединений в шихте и массу каждого элемента в соединениях рассчитываем аналогично расчету  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Полученные результаты заносим в табл. 1.11.

Таблица 1.11

Рациональный состав шихты

Соединения	Элементы										ИТО-ГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
$\text{CuFeS}_2$	4,41	—	—	3,87	4,46	—	—	—	—	—	12,74
$\text{FeS}_2$	—	—	—	12,41	14,27	—	—	—	—	—	26,68
$\text{Cu}_2\text{S}$	8,56	—	—	—	2,16	—	—	—	—	—	10,72
$\text{CuS}$	0,76	—	—	—	0,38	—	—	—	—	—	1,14
$\text{Cu}_2\text{O}$	2,12	—	—	—	—	—	—	—	0,28	—	2,40
$\text{ZnS}$	—	1,88	—	—	0,93	—	—	—	—	—	2,81
$2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$	—	0,08	—	—	—	0,04	—	—	0,02	—	0,14
$\text{ZnO}$	—	1,96	—	—	—	—	—	—	0,48	—	2,44
$\text{PbO}$	—	—	0,61	—	—	—	—	—	0,06	—	0,67
$\text{PbS}$	—	—	0,34	—	0,05	—	—	—	—	—	0,39
$\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	—	0,03	—	0,05	—	—	—	—	0,03	—	0,11
$2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$	—	—	—	3,7	—	1,99	—	—	1,06	—	6,75
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	—	—	—	0,43	—	—	—	—	0,16	—	0,59
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	—	—	—	1,93	—	—	—	—	0,71	—	2,64

Окончание табл. 1.11

Соединения	Элементы										ИТО-ГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
FeO	—	—	—	1,63	—	—	—	—	0,47	—	2,10
FeS	—	—	—	5,32	3,06	—	—	—	—	—	8,38
MgO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,13	0,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	1,10	—	—	—	1,10
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	9,80	—	—	—	—	9,80
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	1,30	—	1,02	2,32
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,96	5,96
ВСЕГО	15,85	3,95	0,95	29,34	25,31	11,83	1,10	1,30	3,28	7,11	100,00

Сравниваем данные табл. 1.10 и 1.11. Значения, полученные в строке «Всего» табл. 1.11, по основным компонентам шихты совпадают со значениями табл. 1.10. Расчет выполнен правильно.

Таким образом, проведенный расчет показал следующее:

- основным компонентом шихты является пирит FeS<sub>2</sub>, его доля в составе шихты — 26,68 %. Основное количество серы в шихте также приходится на пирит (14,27 %). Определили содержание каждого сульфидного соединения, входящего в состав шихты. Эти данные важны для расчета реакций диссоциации сульфидов при плавке и определении количества серы, переходящей в газ, а также количества кислорода, необходимого для окисления серы;
- определили содержание сульфидов и оксидов в шихте; эти данные потребуются при расчете теплового баланса для определения тепла термохимических реакций;
- определили количество основных шлакообразующих компонентов, входящих в состав шихты: 2FeO·SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>. Эти данные нужны для предварительного расчета шлака и определения количества флюсов, которое необходимо ввести в процесс для получения шлака заданного состава;
- определили содержание кислорода в шихте (3,28 %), что даст возможность рассчитать количество дутья, которое нужно подать в печь.

## **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение понятию «металлургическая шихта».
2. Из каких этапов состоит расчет шихты?
3. С какой целью в шихту добавляют флюсы?
4. Что показывает рациональный расчет шихты?
5. Что такое «оборотные материалы»?

---

## 2. Штейны и шлаки медной плавки

---

### 2.1. Свойства штейнов и шлаков медной плавки

---

**За** многолетнюю практику получения медных штейнов металлургами накоплен и обработан огромный практический материал, изучены закономерности поведения отдельных элементов при плавке в различных условиях, составы штейнов и шлаков. На основании полученных данных сформулированы основные правила и выведены эмпирические формулы и закономерности, которые используются в металлургических расчетах.

Штейны медной плавки — это сульфидный расплав, основу которого составляют сульфиды меди  $\text{Cu}_2\text{S}$  и железа  $\text{FeS}$ . Суммарное содержание меди, железа и серы в медных штейнах составляет порядка 90 %. Максимальное содержание меди в штейне 79,9 % (чистый сульфид меди  $\text{Cu}_2\text{S}$ , который называется белым штейном, или белым маттом).

Штейны являются хорошими коллекторами благородных металлов — золота и серебра, которые переходят в штейн на 70–90 %. Но из-за низкого содержания в штейнах (грамм на тонну), в расчетах золото и серебро не учитывают. По благородным металлам составляют отдельный баланс.

Температура плавления штейнов зависит от их состава и колеблется в пределах 900–1300 °С. Плотность штейнов также зависит от состава и находится в диапазоне 4,5–5,3 г/см<sup>3</sup> (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Плотность медных штейнов

Содержание меди в штейне, %	Плотность штейна, г/см <sup>3</sup>	
	Жидкий штейн	Твердый штейн
35,0	4,97	5,19
40,0	5,10	5,34
60,0	5,17	5,42
80,0	5,39	5,55

Плотность жидкого штейна ниже, чем твердого, т. к. жидкий штейн содержит растворенный сернистый газ ( $\text{SO}_2$ ), который удаляется при охлаждении штейна.

Для расчетов штейнов важно следующее положение — правило В. Я. Мостовича: независимо от содержания в штейнах медной плавки меди и железа, содержание серы в них порядка 24–26 %. С ростом содержания меди в штейне, содержание серы снижается. Для расчетов используют, как правило, среднее значение 25 %.

Важным показателем выплавки штейнов является степень десульфуризации, т. е. степень удаления серы в газовую фазу. Расчет степени десульфуризации проводят по формуле

$$D = m_{\text{газ}} \cdot 100 / M_{\text{общ}}, \%$$

где  $m_{\text{газ}}$  — масса серы, перешедшей в газ, кг

$M_{\text{общ}}$  — общая масса серы в шихте, кг.

Степень удаления серы существенно отличается в различных процессах плавки (табл. 2.2) и зависит от количества подаваемого в печь дутья, условий плавки и т. д. Сера при плавке распределяется в основном между газовой фазой и штейном, незначительное количество серы уносится с грубой пылью и переходит в шлак. При укрупненных расчетах можно пренебречь долей серы, вынесенной пылью и перешедшей в шлак, и определить выход штейна, зная степень десульфуризации.

Таблица 2.2

**Основные технологические показатели процессов плавки на штейн**

Показатель	Процесс				
	Шахтная плавка	Отражательная плавка	Процесс Ванюкова	Аусмелт	Взвешенная плавка (НГМК)
Удельная производительность по шихте, т/(м <sup>2</sup> ·сут)	50–65	3–7	50–80	50–140	13–15
Производительность по шихте, т/час	50–60	30–40	45–100	40–120	100–120
Содержание кислорода в дутье, об. %	21	Нет	40–65	30–65	50–80
Извлечение меди в штейн, %	93–95	95–97	96–98	93–95	97,3

Окончание табл. 2.2

Показатель	Процесс				
	Шахтная плавка	Отражательная плавка	Процесс Ванюкова	Аусмелт	Взвешенная плавка (НГМК)
Содержание меди в штейне, мас. %	30–40	25–40	45–60	50–60	47–65
Содержание меди в шлаке, мас. %	0,7–1,2	0,5–0,8	1–1,6	1,5	1–2
Содержание SO <sub>2</sub> в газах, об. %	6–8	1–2	35–40	25–40	До 75 %
Температура отходящих газов, °С	300–600	1150–1200	1200–1300	1200–1300	1200–1300
Пылевынос, % от массы шихты	1,5–2	0,8–1	0,7–1,2	1–3	5–8
Степень десульфуризации, %	30–65	20–25	75–80	80–85	80–85
Расход условного топлива, % от массы шихты	7–10	15–30	2–4	1–3	0,5–0,8
Дополнительная подготовка шихты	Брикетирование	Обжиг	Нет	Нет	Глубокая сушка
Допустимая влажность шихты, %	До 10	7–10	6–9	До 10	1
Обеднение шлаков	Флотация	Флотация	Флотация	Флотация	Флотация

Пример расчета массы и выхода штейна: содержание серы в шихте — 23 %. Степень десульфуризации при плавке в печи Ванюкова — 78 % (см. табл. 2.2). Определить выход штейна.

Проведем расчет на 100 кг загруженной шихты, тогда масса серы, поступившей в процесс, составит 23 кг. Степень десульфуризации 78 %, следовательно, в газовую фазу перейдет 78 % серы от исходного количества

$$23 \cdot 0,78 = 17,94 \text{ кг.}$$

Оставшаяся масса серы перейдет в штейн

$$23 - 17,94 = 5,06 \text{ кг.}$$

Согласно правилу В. Мостовича содержание серы в медном штейне — 25 %, тогда масса штейна составит

5,06 кг серы — 25 % от массы штейна

$$M_{\text{штейна}} = 100 \%$$

$$M_{\text{штейна}} = 5,06 \cdot 100 / 25 = 20,24 \text{ кг.}$$

Выход штейна = масса штейна · 100/масса шихты.

Расчет провели на 100 кг шихты, соответственно выход штейна составит 20,24 %.

В штейнах всегда присутствует кислород. Определить содержание кислорода в штейне можно по табл. 2.3 [1].

Таблица 2.3

Приведенные соотношения компонентов штейна, %

Компонент	Содержание, %					
Cu	20,0	30,0	40,0	45,0	50,0	60,0
Fe	49,32	41,00	32,68	28,51	24,80	16,21
S	25,3	24,8	24,3	24,0	23,3	23,09
O <sub>2</sub>	5,38	4,21	3,02	2,49	1,90	0,70

Кислород в штейнах присутствует в виде магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Содержание железа, связанного в магнетит, можно рассчитать относительно известной массы кислорода в штейне

$$x = y \cdot \frac{55,8 \cdot 3}{16 \cdot 4},$$

где 55,8 и 16 — атомные массы железа и кислорода соответственно.

Содержание магнетита и меди в штейнах зависит и от температуры в печи. Для более точного определения содержания магнетита и меди в штейнах при разной температуре можно воспользоваться графиком (рис. 2.1).

Шлаки медной плавки — это расплав оксидов; основные компоненты шлака — FeO, SiO<sub>2</sub>, CaO. Суммарное содержание этих трех оксидов в шлаке достигает 80 %. Содержание меди в шлаке зависит от состава шлака и содержания меди в штейне (рис. 2.2—2.3). Медь в шлаке присутствует из-за механического запутывания капель штейна в шла-



ковом расплаве (механические потери) и протекания реакций окисления на границе раздела «шлак — штейн» (химические потери).

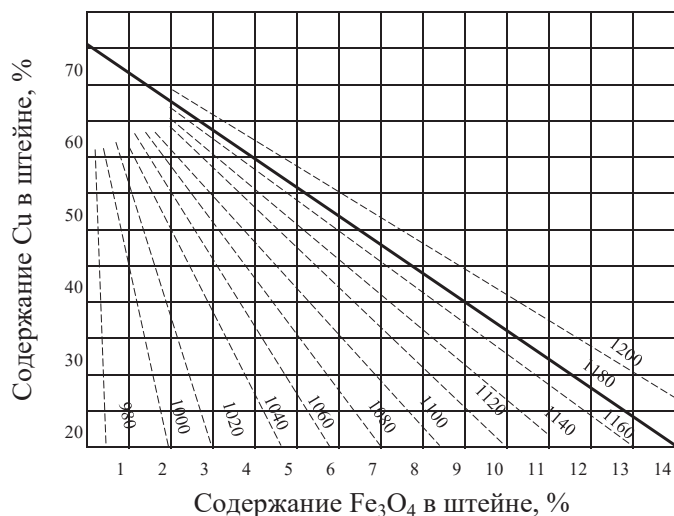


Рис. 2.1. Зависимость растворимости магнетита в штейне от температуры и содержания в штейне меди

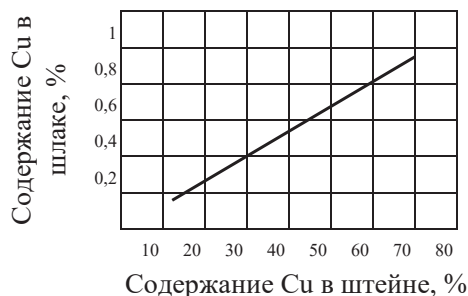


Рис. 2.2. Зависимость содержания меди в шлаке от содержания меди в штейне (химические потери)

Для снижения механических потерь меди необходимо создать условия для хорошего отстаивания расплавов и получить шлаки определенного состава (с низкой плотностью). Для получения шлаков нужного состава в шихту вводят флюсы — кварц  $SiO_2$  (кислый флюс) и известняк  $CaCO_3$  (основной флюс).

Добавка кварца снижает плотность шлака, т. к. оксид кремния связывает оксиды железа (рис. 2.4). Добавка известняка позволяет снизить кислотность шлака.

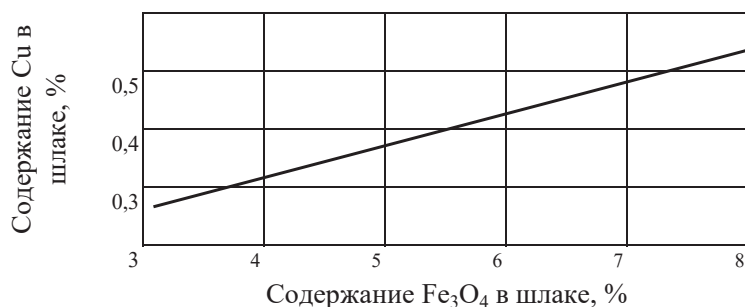


Рис. 2.3. Зависимость содержания меди в медеплавильном шлаке от содержания магнетита

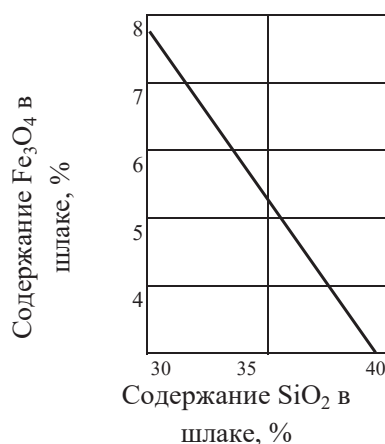


Рис. 2.4. Зависимость содержания магнетита в медеплавильном шлаке от содержания оксида кремния

## 2.2. Основные процессы получения медных штейнов

В мировой практике для выплавки медных штейнов применяют разные способы: шахтную плавку, отражательную плавку, взвешенную плавку, плавку в печах с погружной фурмой, процесс Ванюкова, процесс Мицубиси и др. В мире работает более 50 медеплавильных заводов, а технологий плавки на штейн разработано более 20. Несмотря на такой большой выбор технологий, далеко не все используются на практике. Выбор того или иного способа определяется в основном составом исходного сырья, которое зависит от разрабатываемых

месторождений меди — медно-цинковых, медно-порфировых, медно-никелевых и др. В настоящее время традиционные процессы — шахтную и отражательную плавки — широко заменяют автогенными процессами, которые позволяют эффективно использовать тепло экзотермических реакций.

Принципиальная схема получения меди пирометаллургическим способом приведена на рис. 2.5.

На предприятиях России используют следующие процессы плавки на штейн:

- шахтную плавку (АО «Медногорский медно-серный комбинат» г. Медногорска Оренбургской области и филиал АО «Урал-электромедь» — «Производство полиметаллов» г. Кировграда Свердловской области (бывший Кировградский медеплавильный комбинат) — оба предприятия входят в состав Уральской горно-металлургической компании);
- отражательную плавку обожженного сырья (АО «Святогор» г. Красноуральска Свердловской области — входит в состав Уральской горно-металлургической компании — идет реконструкция предприятия с заменой отражательной плавки на процесс «Аусмелт»;
- процесс Ванюкова (плавка в жидкой ванне) (АО «Среднеуральский медеплавильный завод» г. Ревда Свердловской области — входит в состав Уральской горно-металлургической компании; Надеждинской металлургической завод и Медный завод горно-металлургической компании «Норильский никель», Красноярский край);
- процесс «Аусмелт» (плавка в печи с погружной фурмой) (ЗАО «Карабашмедь» г. Карабаш Челябинской области — входит в состав Русской медной компании);
- процесс взвешенной плавки (Надеждинский металлургический завод им. Б. И. Колесникова горно-металлургической компании «Норильский никель», Красноярский край);
- процесс СПК (совмещенная плавка — конвертирование) (АО «Медногорский медно-серный комбинат» г. Медногорска Оренбургской области — входит в состав Уральской горно-металлургической компании).

Основные технологические показатели процессов приведены в табл. 2.2.

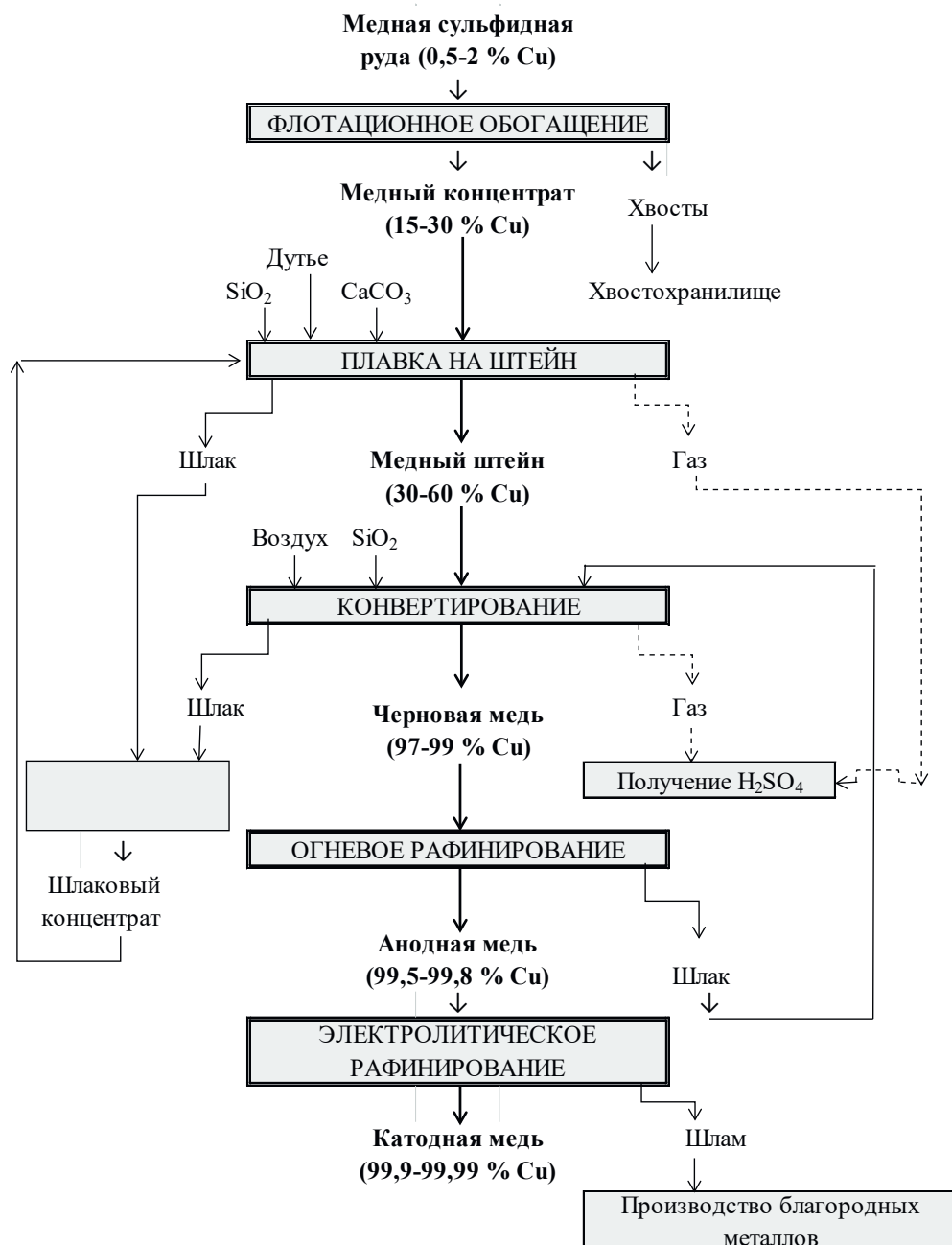


Рис. 2.5. Принципиальная схема получения меди пирометаллургическим способом

### **Контрольные вопросы**

---

1. Какие химические соединения составляют основу медных штейнов?
2. Какие технологические процессы для выплавки медных штейнов применяют на предприятиях РФ?
3. С какой целью при плавке добавляют известковый флюс?
4. От каких факторов зависит содержание меди в шлаке?
5. Дайте определение понятию «десульфуризация».

## 3. Тепловой баланс процесса

### 3.1. Статьи прихода и расхода тепла

**Т**епловой баланс плавки рассчитывают после полного расчета материального баланса. В тепловом балансе учитывают количество тепла, которое поступило в печь с шихтой и дутьем, выделившееся и поглощенное в результате термохимических реакций в печи, унесенное продуктами плавки и т. д. Эти данные оформляют в виде таблицы (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Общий вид таблицы теплового баланса

Приход тепла			Расход тепла		
Статья баланса	кДж	%	Статья баланса	кДж	%
Шихта	х	х	Шлак	х	х
Флюсы	х	х	Штейн	х	х
Дутье	х	х	Пыль	х	х
Экзотермические реакции	х	х	Технологические газы	х	х
Горение топлива	х	х	Нагрев и расплавление шихты	х	х
			Испарение влаги шихты	х	х
			Эндотермические реакции	х	х
			Водяное охлаждение	х	х
			Потери через кладку	х	х
			Неучтенные потери	х	х
ИТОГО $Q_{\text{прих}}$	XX	100	ИТОГО $Q_{\text{расх}}$	XX	100

В зависимости от процесса и конструкции агрегата, могут добавляться или удаляться статьи в приходной и расходной части (например, если в печи отсутствует водяное охлаждение, такой статьи

расхода тепла в балансе не будет). Для расчета отдельных статей баланса необходимы данные о рациональном составе шихты; массе материалов, загруженных в печь, и массе полученных продуктов; составе дутья и отходящих газов; количестве топлива и его составе и т. д. Все эти данные получают при расчете материального баланса процесса.

После расчета отдельных статей теплового баланса общее количество тепла в приходной и расходной части должно быть

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}.$$

Если это равенство не выполнено, но все статьи баланса рассчитаны верно, необходимо скорректировать количество топлива, подаваемого в печь:

- если  $Q_{\text{прих}} > Q_{\text{расх}}$ , то тепла в печь приходит больше необходимого, количество топлива нужно снизить;
- если  $Q_{\text{прих}} < Q_{\text{расх}}$ , то тепла в печь приходит меньше необходимого, количество топлива нужно увеличить.

Для корректировки расхода топлива рассчитывают разницу между большим и меньшим значением, например, в случае  $Q_{\text{прих}} > Q_{\text{расх}}$

$$Q_{\text{прих}} - Q_{\text{расх}} = \Delta Q.$$

Затем определяют массу топлива, кг, при сгорании которой выделяется такое количество тепла (подробный расчет приведен в разделе «Расчет горения топлива»):

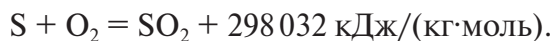
$$m = \Delta Q / Q,$$

где  $m$  — масса топлива, кг;  $Q$  — теплота сгорания топлива, МДж/кг, — и на это количество  $m$  уменьшают массу топлива, определенную при расчете материального баланса. Но важно учесть, что изменение массы топлива потребует пересчета количества кислорода, необходимого для его сжигания, а также состава и количества отходящих из печи газов. Следовательно, потребуются корректировка материального баланса и соответствующих статей теплового баланса. Для учета всех этих статей необходимо составить уравнение теплового баланса.

Подробно методика расчета с составлением уравнения теплового баланса рассмотрена в подгл. 7.3.

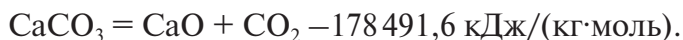
### 3.2. Расчет тепловых эффектов реакций

В пирометаллургических процессах компоненты сырья, поступающего в печь, претерпевают кардинальные изменения под действием высоких температур из-за окисления за счет кислорода дутья, а также из-за химических реакций между собой. Все эти химические процессы могут быть как экзотермическими (при их прохождении выделяется тепло), так и эндотермическими (тепло поглощается, т. е. эти реакции требуют подачи тепла в зону реакции). Общее название таких реакций «термохимические». Если реакция идет с выделением тепла, то записывается следующим образом:



Тепловой эффект имеет знак «+».

Если реакция эндотермическая, то тепловой эффект имеет знак «—»

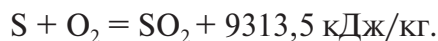


Тепловой эффект рассчитывается для реагента, вступающего в реакцию, а не для продукта реакции. В разных справочниках могут приводиться различные значения тепловых эффектов одних и тех же реакций. Разница возникает из-за расчета в 1 кДж/(кг·моль) или в 1 кДж/кг вещества, вступившего в реакцию.

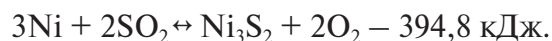
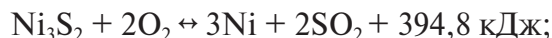
Тепловой эффект реакции окисления серы, кДж/(кг·моль),



Тепловой эффект реакции окисления 1 кг серы



Тепловые эффекты прямой и обратной реакций одинаковы по значению, но противоположны по знаку



С выделением тепла проходят, например, реакции окисления сульфидов, шлакообразования, горения топлива. С поглощением — ре-



акции диссоциации карбонатов, высших сульфидов, реакции сульфидирования и др. Все тепловые эффекты протекающих реакций необходимо учитывать при расчетах теплового баланса процесса, т. к. это существенно влияет на температуру в печи и расход топлива. Как было сказано выше, тепловой баланс рассчитывают после полного расчета материального баланса, в котором определяют количество веществ, вступающих в реакции. Тепло экзотермических реакций учитывают в приходной части теплового баланса, эндотермических — расходной.

Если тепловой эффект реакции приведен в килоджоулях на килограмм на моль, то расчет количества тепла, которое выделяется или поглощается в результате протекания реакции, кДж, проводим по формуле

$$Q = mQ_n/M,$$

где  $m$  — масса соединения (элемента), вступающего в реакцию, кг;

$Q_n$  — тепловой эффект реакции, кДж/(кг·моль);

$M$  — молекулярная масса соединения (элемента).

Если тепловой эффект реакции указан в килоджоулях на килограмм, то расчет количества тепла, которое выделяется или поглощается в результате протекания реакции, кДж, проводим по формуле

$$Q = mQ_n,$$

где  $m$  — масса соединения (элемента), вступающего в реакцию, кг;

$Q_n$  — тепловой эффект реакции, кДж/кг.

Тепловые эффекты основных реакций, кДж/(кг·моль), приведены ниже.

#### Тепловые эффекты реакций

Реакция	кДж/(кг·моль)
<b>Экзотермические реакции</b>	
$2\text{FeS} + 3\text{O}_2 = 2\text{FeO} + 2\text{SO}_2$	937 340
$3\text{FeS} + 5\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{SO}_2$	1 729 224
$2\text{FeS} + 3,5\text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{SO}_2$	1 056 300
$2\text{FeO} + \text{SiO}_2 = 2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$	92 110
$6\text{Fe} + 4\text{O}_2 = 2\text{Fe}_3\text{O}_4$	635 560
$3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$	1 121 400
$2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$	535 080
$2\text{Fe} + \text{O}_2 + \text{SiO}_2 = \text{Fe}_2\text{SiO}_4$	611,52

Реакция	кДж/(кг·моль)
<b>Экзотермические реакции</b>	
$\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2\text{CuO} + \text{SO}_2$	529 872
$\text{Cu}_2\text{S} + 1,5 \text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{O} + \text{SO}_2$	390 600
$\text{Cu}_2\text{S} + 2 \text{O}_2 = 2\text{Cu} + \text{SO}_2$	218 232
$\text{Cu}_2\text{S} + 3\text{O}_2 = 2\text{Cu} + 2\text{SO}_3$	633 780
$4\text{Cu} + \text{O}_2 = 2\text{CuO}$	341 040
$\text{ZnS} + 1,5\text{O}_2 = \text{ZnO} + \text{SO}_2$	443 646
$2\text{Zn} + \text{O}_2 = 2\text{ZnO}$	348 000
$\text{PbS} + 1,5\text{O}_2 = \text{PbO} + \text{SO}_2$	423 444
$\text{PbS} + 2\text{O}_2 = \text{PbSO}_4$	827 232
$\text{Pb} + \text{S} = \text{PbS}$	94 668
$\text{CoS} + 1,5\text{O}_2 = \text{CoO} + \text{SO}_2$	453 600
$2\text{Ni}_3\text{S}_2 + 7\text{O}_2 = 6\text{NiO} + 4\text{SO}_2$	2 303 616
$\text{Ni} + 1/2\text{O}_2 = \text{NiO}$	245 280
$\text{Ni}_3\text{S}_2 + 2\text{O}_2 \rightarrow 3\text{Ni} + 2\text{SO}_2$	394,8
$\text{Ni}_3\text{S}_2 + 7/2\text{O}_2 \leftrightarrow 3\text{NiO} + 2\text{SO}_2$	1125,6
$\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	90 316,8
$\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$	298 032
$2\text{S} + 3\text{O}_2 = 2\text{SO}_3$	793 380
$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	395 018,4
$\text{C} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}$	110 947,2
$2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$	568 176
$\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$	35 784
$\text{C}_2\text{H}_6 + 2\text{O}_2 = 2\text{CO} + \text{H}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	621 012
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} (\text{ж})$	485 520
$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} (\text{пар})$	243 054
<b>Эндотермические реакции</b>	
$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$	178 491,6
$\text{MgCO}_3 = \text{MgO} + \text{CO}_2$	111 174
$\text{Cu}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Cu} + 1/2\text{O}_2$	167 328
$2\text{CuFeS}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{S} + 2\text{FeS} + 1/2\text{S}_2$	78 246
$3\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeS} + 5\text{SiO}_2 = 5(2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2) + \text{SO}_2$	19 930
$\text{FeS}_2 \rightarrow \text{FeS} + \text{S}$	83 160
$\text{FeS} \rightarrow \text{Fe} + \text{S}$	95 424
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	34 708,8
$\text{FeO} + \text{CaS} = \text{FeS} + \text{CaO}$	27 606,6
$\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 3\text{FeO} + 1/2\text{O}_2$	318 780
$\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{FeO} + 1/2\text{O}_2$	298 620

Реакция	кДж/(кг·моль)
<b>Эндотермические реакции</b>	
$\text{ZnS} \rightarrow \text{Zn} + \frac{1}{2}\text{S}_2$	203 700
$\text{ZnO} + \text{S} \rightarrow \text{ZnS} + \frac{1}{2}\text{O}_2$	145 614
$\text{ZnO} + \text{CO} = \text{Zn} + \text{CO}_2$	65 242,8
$\text{PbO} + \text{CO} = \text{Pb} + \text{CO}_2$	20 008,8
$\text{PbO} \rightarrow \text{Pb} + \frac{1}{2}\text{O}_2$	218 694
$3\text{NiO} + 3\text{CaS} = \text{Ni}_3\text{S}_2 + 3\text{CaO} + 0,5\text{S}_2$	134 568
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	19 908
$\text{CaSO}_4 = \text{CaS} + 2 \text{O}_2$	959 112
$\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	502 152

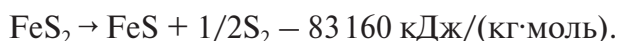
**Пример 1.** При плавке медной шихты, в результате диссоциации сульфидов в газовую фазу перешло 6,7 кг серы. Атомная масса серы — 32 г/моль. Рассчитаем тепло, которое поступает в процесс от окисления 6,7 кг серы до диоксида  $\text{SO}_2$ , в виде которого сера находится в газах. Реакция окисления серы



Реакция экзотермическая, выделится тепла при окислении 6,7 кг серы

$$6,7 \cdot 298\,032/32 = 62\,400,5 \text{ кДж}.$$

**Пример 2.** По расчету рационального состава шихты установили, что масса пирита в 100 кг шихты составляет 23 кг. Определить затраты тепла на термическую диссоциацию пирита. Реакция термического разложения пирита



Молекулярная масса пирита

$$55,8 + 32 \cdot 2 = 119,8 \text{ г/моль},$$

где 55,8 — атомная масса железа, г/моль;

32 — атомная масса серы, г/моль.

Количество поглощенного тепла

$$23 \cdot 83\,160/119,85 = 15\,960 \text{ кДж}.$$

### 3.3. Расчет тепла от горения топлива

Для создания высоких температур в металлургических агрегатах используют твердое топливо (кокс, коксовую мелочь, бурый уголь и т. д.), жидкое (мазут) и газообразное (природный газ, коксовый газ и др.) топливо. Теплотворная способность топлива разная (табл. 3.2). Для того чтобы иметь возможность сравнить теплопроизводительности разных видов топлива, ввели понятие условного топлива, теплота сгорания которого принята равной 7 000 ккал, или 29 400 кДж для 1 кг твердого (жидкого) условного топлива или 1 м<sup>3</sup> газообразного. Зная удельный расход условного топлива для конкретного процесса, можно рассчитать расход выбранного топлива — кокса, угля, природного газа и т. д.

Таблица 3.2

Удельная теплота сгорания топлива

Вид топлива	Название	Удельная теплота сгорания, МДж/(кг·м <sup>3</sup> )
Условное топливо		29,4
Твердое	Антрацит	26,8–34,8
Твердое	Кокс металлургический	30,4
Твердое	Уголь бурый	13,0–25,0
Твердое	Уголь каменный	27,0
Твердое	Уголь коксующийся	36,3
Жидкое	Мазут высокосернистый	39,0
Жидкое	Мазут малосернистый	40,5
Жидкое	Мазут низкосернистый	41,7
Жидкое	Мазут сернистый	39,6
Газообразное	Природный газ	41,0–49,0

Теплота сгорания топлива  $Q_{\text{топл}}$  (МДж) — это тепловой эффект реакции окисления кислородом элементов, входящих в состав топлива, до образования высших оксидов —  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Для полного сгорания массовой или объемной единицы топлива необходимо определенное количество кислорода, которое называется теоретически необходимым. Таким образом, рассчитать теплоту сгорания топлива при расчете теплового баланса можно разными методами. Вариант 1 — с использованием данных табл. 3.2. Определив массу топлива (например

по практическим данным работы металлургического агрегата) и зная удельную теплоту сгорания выбранного топлива, тепло, выделившееся при сгорании, МДж, можно определить по формуле

$$Q_{\text{топл}} = mQ,$$

где  $m$  — масса топлива, кг;

$Q$  — теплота сгорания топлива, МДж/кг.

Например, при расчете материального баланса шахтной плавки, по практическим данным приняли расход кокса 10 % от массы загруженной шихты. Масса кокса на 100 кг шихты составит 10 кг. По данным табл. 3.2 теплота сгорания кокса составляет 30,4 МДж/кг, тогда при сгорании 10 кг кокса выделится тепла

$$10 \cdot 30,4 = 304 \text{ МДж.}$$

Вариант 2 — первый метод не учитывает химического состава топлива, а содержание горючих компонентов в топливе может быть различным (табл. 3.3–3.4). В этом случае, зная химический состав топлива, теплоту его сгорания можно определить по реакциям горения отдельных компонентов топлива.

Таблица 3.3

## Химический состав кокса, %

Компонент	Формула/обозначение	Содержание, мас. %
Углерод	C	80–97
Сера	S	1–2
Водород	H <sub>2</sub>	1,00–1,50
Кислород	O <sub>2</sub>	0,5–0,7
Азот	N <sub>2</sub>	До 1,30
Влага	W	До 4,5
Зола	A	10–12

Таблица 3.4

## Химический состав природного газа

Компонент	Формула	Содержание, об. %
Метан	CH <sub>4</sub>	75,0–98
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,5–15,1
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,1–1,5
Изобутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,01–0,3

Окончание табл. 3.4

Компонент	Формула	Содержание, об. %
Азот	$N_2$	0,7–5,6
Диоксид углерода	$CO_2$	0,1–1,0
Кислород	$O_2$	0,01–0,1
Водород	$H_2$	Следы — 0,02
Сероводород	$H_2S$	Следы — 0,02

Для расчета низшей теплотворной способности топлива ( $Q_n$ ) можно использовать эмпирическую формулу Д. И. Менделеева

$$Q_n = 0,339 \cdot \% C + 1,025 \cdot \% H + 0,1085 \cdot \% S - 0,1085 \cdot \% O - 0,025 \cdot \% W,$$

где  $\%C, \%H, \%S, \%O, \%W$  — содержание элементов топлива, мас. %.

Теплоту сгорания природного газа,  $\text{кДж/м}^3$ , можно определить по приведенной формуле Д. И. Менделеева для газов

$$Q_{PH} = 358,18 \cdot \%CH_4 + 637,48 \cdot \%C_2H_6 + 912,3 \cdot \%C_3H_8 + 1186,46 \cdot \%C_4H_{10},$$

где  $\%C_2H_6, \%CH_4, \%C_3H_8, \%C_4H_{10}$  — содержание элементов топлива, об. %.

Тепло, выделившееся при горении кокса, можно рассчитать как тепло экзотермических реакций



Так, для кокса состава, %: C — 77,5; S — 2; остальное — прочие вещества — при массе кокса 10 кг (как в примере варианта 1) тепловой эффект горения составит:

- реакция горения углерода

$$Q_1 = 7,75 \cdot 395018,4/12 = 255116,05 \text{ кДж},$$

где 7,75 — масса углерода в 10 кг кокса, кг;

395018,4 — тепловой эффект реакции,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{моль})$ ;

12 — атомная масса углерода, г/моль;

- реакция горения серы

$$Q_2 = 2 \cdot 298032/32 = 18627 \text{ кДж},$$

где 2 — масса серы в 10 кг кокса, кг;  
 298 032 — тепловой эффект реакции, кДж/(кг·моль);  
 32 — атомная масса серы, г/моль;  
 • суммарный тепловой эффект реакций

$$255\,116,05 + 18\,627 = 273\,743,05 \text{ кДж, или } 273,74 \text{ МДж.}$$

Полученный результат ниже, чем рассчитанный по варианту 1, но более точный.

Вариант 3 — пересчет количества условного топлива на выбранное топливо. Расход условного топлива при плавке в печи Ванюкова составляет 2–4 % от массы шихты (см. табл. 2.2). Примем средний расход 2,5 % или на 100 кг шихты 2,5 кг условного топлива. При сжигании такого количества условного топлива выделится тепла

$$2,5 \cdot 29,4 = 73,5 \text{ МДж,}$$

где 29,4 — удельная теплота сгорания условного топлива, МДж/кг.

Если в печь Ванюкова подается природный газ, его потребуется

$$73,5/42 = 1,75 \text{ м}^3,$$

где 42 — удельная теплота сгорания природного газа, МДж/м<sup>3</sup> (см. табл. 3.2).

### 3.4. Тепло компонентов шихты и продуктов плавки

Количество тепла, вносимого подаваемыми в печь шихтовыми материалами и уносимого нагретыми и расплавленными продуктами процесса, кДж, рассчитывается по формуле

$$Q = mc_p \cdot t,$$

где  $m$  — масса материала (продукта), кг;

$c_p$  — удельная теплоемкость материала (продукта), кДж/(кг·град);

$t$  — температура материала (продукта), с которой он попадает в печь или уходит из печи, °С.

Массы всех исходных материалов (шихты, флюсов и т. д.) и продуктов процесса (штейна, шлака, пыли и т. п.) берем из таблицы матери-

ального баланса процесса. Температуру дутья без подогрева и температуру материалов, загружаемых в печь в твердом виде (кроме огарка при отражательной плавке), принимаем равной 20 °С. Температуры продуктов процесса, с которой они покидают печь, зависят от процесса и конструкции печи. Температура штейна обычно составляет 1100–1200 °С, шлака — 1200 °С.

Удельные теплоемкости исходных материалов и продуктов можно определить расчетным путем или принять по данным справочной литературы. Рассчитать теплоемкость исходного материала (продукта) можно, зная удельные теплоемкости его отдельных компонентов и их содержание в материале (продукте), по формуле

$$C_{\text{общ}} = \sum c_i \cdot n_i,$$

где  $c_i$  — удельная теплоемкость  $i$ -го компонента, кДж/(кг·°С);

$n_i$  — доля  $i$ -го компонента в общем составе, доли ед.

Удельные теплоемкости отдельных веществ и соединений приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Средние теплоемкости соединений и веществ, кДж/(кг·град)

Металл	$c_p$	Оксид	$c_p$	Сульфид	$c_p$
Al	1,09	SiO <sub>2</sub>	1,134	FeS	0,570
Mo	0,37	FeO	0,84	FeS <sub>2</sub>	0,546
Cd	0,26	CaO	1,05	Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub>	0,672
Co	0,69	MgO	1,05	Cu <sub>2</sub> S	0,475
Cu	0,49	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,26	CuS	0,521
Ni	0,73	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,609	CuFeS <sub>2</sub>	0,542
Fe	0,82	ZnO	0,84	PbS	0,214
Pb	0,14	2FeO·SiO <sub>2</sub>	1,008	ZnS	0,517
Mg	1,34	2CaO·SiO <sub>2</sub>	1,344	CoS	0,525

**Пример расчета удельной теплоемкости штейна.** Для наглядности и удобства расчета все данные представим в виде таблицы (табл. 3.6). На этапе расчета материального баланса плавки вычислили рациональный состав штейна и определили долю каждого химического соединения в штейне — эти данные заносим в столбцы «Соединения» и «Содержание в штейне»; по табл. 3.5 находим теплоемкости каждого компонента штейна и заносим в столбец «Теплоемкость» табл. 3.6. Далее рассчитываем теплоемкость каждого соединения с учетом его



содержания в штейне. Суммируя полученные значения, находим теплоемкость штейна заданного состава.

Таблица 3.6

## Расчет теплоемкости штейна заданного состава

Соединение	Содержание в штейне, %	Теплоемкость, кДж/(кг·град)	Теплоемкость соединения в штейне, кДж/(кг·град)
Cu <sub>2</sub> S	35,0	0,475	$35 \cdot 0,475/100 = \mathbf{0,1663}$
FeS	49,4	0,570	$49,4 \cdot 0,570/100 = \mathbf{0,2816}$
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	14,1	0,609	$14,1 \cdot 0,609/100 = \mathbf{0,0859}$
PbS	1,5	0,214	$1,5 \cdot 0,214/100 = \mathbf{0,0032}$
ИТОГО	100,0	—	$0,1663 + 0,2816 + 0,0859 + 0,0032 = \mathbf{0,537}$

Теплоемкость штейна заданного состава составит 0,537 кДж/(кг·°C).

Теплоемкость шлака можно рассчитать аналогичным образом, зная его состав, или принять по данным табл. 3.7 [7].

Таблица 3.7

## Средняя теплоемкость шлака

Содержание основных компонентов в шлаке, %					$c_p$ , кДж/(кг·°C)
SiO <sub>2</sub>	FeO	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
23,3	55,1	0,8	1,5	4,5	1,34
30,6	56,3	2,0	3,5	3,7	1,36
34,1	36,6	6,6	11,5	8,7	1,32
36,7	31,4	3,1	15,9	10,2	1,36
39,5	30,8	4,4	11,6	13,0	1,25
43,0	27,3	5,6	18,2	7,2	1,31
44,1	21,6	3,7	19,7	6,7	1,29
47,5	19,0	11,5	10,0	10	1,18
60,7	13,8	3	14,4	6,1	1,29
28,0	14,4	16,8	24,8	6,6	1,45
28,0	17,6	16,8	24,8	6,6	1,47
27,0	60,0	1,8	2,6	3,2	1,35

Теплоемкости дутья и газов, уходящих из печи, рассчитываем аналогично расчету теплоемкости штейна. Удельные теплоемкости компонентов газовой смеси при различных температурах приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Средние теплоемкости газов при различных температурах, кДж/(м<sup>3</sup>·°С)

Температура, °С	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Воздух
0	1,298	1,302	1,281	1,604	1,499	1,739	0,915	1,302
100	1,302	1,306	1,294	1,705	1,512	1,819	0,934	1,306
200	1,302	1,310	1,302	1,793	1,529	1,894	0,972	1,310
300	1,310	1,319	1,302	1,873	1,546	1,961	1,003	1,319
400	1,319	1,331	1,306	1,936	1,571	2,024	1,031	1,331
500	1,331	1,348	1,310	1,995	1,596	2,075	1,054	1,348
600	1,344	1,361	1,315	2,050	1,621	2,121	1,074	1,361
700	1,357	1,378	1,319	2,096	1,646	2,159	1,09	1,373
800	1,369	1,390	1,323	2,138	1,672	2,188	1,103	1,386
900	1,382	1,403	1,327	2,176	1,701	2,222	1,115	1,403
1000	1,394	1,415	1,336	2,209	1,730	2,243	1,125	1,415
1100	1,407	1,428	1,340	2,243	1,756	2,268	1,134	1,428
1200	1,420	1,441	1,348	2,272	1,781	2,285	1,151	1,436
1300	1,428	1,453	1,357	2,297	1,810	2,306	1,158	1,449
1400	1,441	1,462	1,365	2,323	1,835	2,327	1,166	1,457
1500	1,449	1,470	1,373	2,344	1,861	2,348	1,173	1,474

### 3.5. Перевод массы газов в объем

При расчетах состава дутья и газов используют понятия «весовые (массовые) проценты» и «объемные проценты». При расчете количества дутья и отходящих газов пользуются обычно массовыми процентами, но теплоемкость газов указывается в килоджоулях на кубический метр на градус Цельсия (кДж/(м<sup>3</sup>·°С)), поэтому при расчете теплового баланса нужен пересчет массовых процентов в объемные.

Масса газа связана с объемом газа

$$V = m/p,$$

где  $V$  — объем газа, м<sup>3</sup>;

$m$  — масса газа, кг;

$p$  — плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Для перевода массы газа в объем используем закон Авогадро, по которому 1 г/моль любого газа при нормальных условиях ( $P = 0,1$  МПа

и  $T = 298 \text{ K}$ ) занимает объем  $22,4 \text{ л (дм}^3\text{)}$ , или  $1 \text{ кг/моль} — 22,4 \text{ м}^3$ . Следовательно, плотность газа можно рассчитать по формуле,  $\text{кг/м}^3$ ,

$$\rho = M/22,4,$$

где  $M$  — молекулярная масса газа.

В таком случае формула пересчета массы газа в объем,  $\text{м}^3$ , будет

$$V = m/\rho = 22,4m/M.$$

Примеры пересчета состава газов из массовых процентов в объемные и наоборот приведены в табл. 3.9 и 3.10.

Таблица 3.9

**Пересчет массового содержания компонентов газовой смеси  
в объемное**

Компонент газовой фазы	Содержание, мас. %	Молекулярная масса, г/моль	Объем, $\text{м}^3$	Содержание, об. %
$\text{N}_2$	65,0	$14 \cdot 2 = 28$	$65 \cdot 22,4/28 = 52,00$	$52 \cdot 100/71,85 = \mathbf{72,38}$
$\text{CO}_2$	14,0	$12 + 16 \cdot 2 = 44$	$14 \cdot 22,4/44 = 7,13$	$7,13 \cdot 100/71,85 = \mathbf{9,92}$
$\text{SO}_2$	15,0	$32 + 16 \cdot 2 = 64$	$15 \cdot 22,4/64 = 5,25$	$5,25 \cdot 100/71,85 = \mathbf{7,31}$
$\text{H}_2\text{O}_{(\text{газ})}$	6,0	$1 \cdot 2 + 16 = 18$	$6 \cdot 22,4/18 = 7,47$	$7,47 \cdot 100/71,85 = \mathbf{10,4}$
<b>ВСЕГО</b>	100,0	—	71,85	$72,37 + 9,92 + 7,31 + 10,39 = \mathbf{100,0}$

Таблица 3.10

**Пересчет объемного содержания компонентов газовой смеси  
в массовое**

Соединение	Содержание, об. %	Молекулярная масса, г/моль	Масса газа на общий объем $100 \text{ м}^3$ , кг	Содержание, мас. %
$\text{N}_2$	72,38	28	$72,38 \cdot 28/22,4 = 90,48$	$90,48 \cdot 100/139,21 = \mathbf{65,0}$
$\text{CO}_2$	9,92	44	$9,92 \cdot 44/22,4 = 19,49$	$19,49 \cdot 100/139,21 = \mathbf{14,0}$
$\text{SO}_2$	7,31	64	$7,31 \cdot 64/22,4 = 20,89$	$20,89 \cdot 100/139,21 = \mathbf{15,0}$
$\text{H}_2\text{O (газ)}$	10,4	18	$10,4 \cdot 18/22,4 = 8,35$	$8,35 \cdot 100/139,21 = \mathbf{6,0}$
<b>ВСЕГО</b>	100,00	—	139,21	100,00

## Контрольные вопросы

1. Назовите виды топлива, применяемые в металлургии цветных металлов.
2. Что такое «условное топливо»?
3. Назовите основные статьи прихода и расхода тепла.
4. Приведите формулу для расчета количества тепла, вносимого в печь шихтовыми материалами.
5. К какой статье баланса относят тепло эндотермических реакций?

---

## 4. Шахтная плавка первичного и вторичного медьсодержащего сырья

---

**Ш**ахтная плавка принадлежит к наиболее старым способам переработки медного сырья на штейн, она существует уже несколько столетий и постоянно совершенствуется. Несмотря на разработку автогенных процессов и все более широкое применение их для переработки сульфидного медного сырья, для совместной переработки низкокачественного вторичного и первичного медного сырья по-прежнему применяют шахтную плавку. В этом случае исходным сырьем являются брикетированные медные и шлаковые концентраты, медная руда — первичное сырье; кек, клинкер, лом, стружка, биметаллы, оборотные шлаки — вторичное низкокачественное сырье.

Современная шахтная плавка — хорошо освоенный и изученный процесс, по своей производительности не уступающий новым процессам получения медных штейнов. Современные методы подготовки шихты к плавке, применение подогретого дутья, обогащение дутья кислородом позволяют снизить расход кокса и улучшить технико-экономические показатели процесса. Брикетирование для мелкодисперсных шихтовых материалов применяют в филиале «Производство полиметаллов» АО «Уралэлектромедь» (г. Кировград Свердловской области) и на Медногорском медно-серном комбинате (ММСК) (г. Медногорск Оренбургской области). На ММСК на плавку поступает в основном первичное сырье, в филиале АО «Уралэлектромедь» ППМ перерабатывают первичное и вторичное сырье.

Конструкция печей для медной плавки первичного и совместной плавки первичного и вторичного сырья аналогичны. У шахтной печи вертикальное рабочее пространство; в поперечном сечении печь имеет прямоугольную форму (рис. 4.1). Шахта печи состоит из кессонов испарительного или водяного охлаждения. При работе печи, поверхность кессонов с внутренней стороны покрывается гарнисажем — слоем застывшего расплава, основной составляющей которого является

магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Такой защитный слой предохраняет кессоны от разъедания жидкими продуктами плавки.

Шихту, флюсы и топливо (кокс) периодически подают в печь через загрузочные окна в верхней части печи (колошниковой площадке) отдельными порциями (колошами). По мере плавления шихта опускается вниз, а на ее место загружается следующая колоша. Загрузка шихты в печь начинается при опускании уровня сыпи на 2 м ниже порога.

В результате горения топлива и плавления шихты образуются топочные и технологические газы, которые имеют очень высокую температуру. Газы поднимаются вверх через столб холодной шихты и нагревают ее; нагрев идет по принципу противотока. Такой теплообмен обеспечивает высокий коэффициент использования тепла — до 80–85 %.

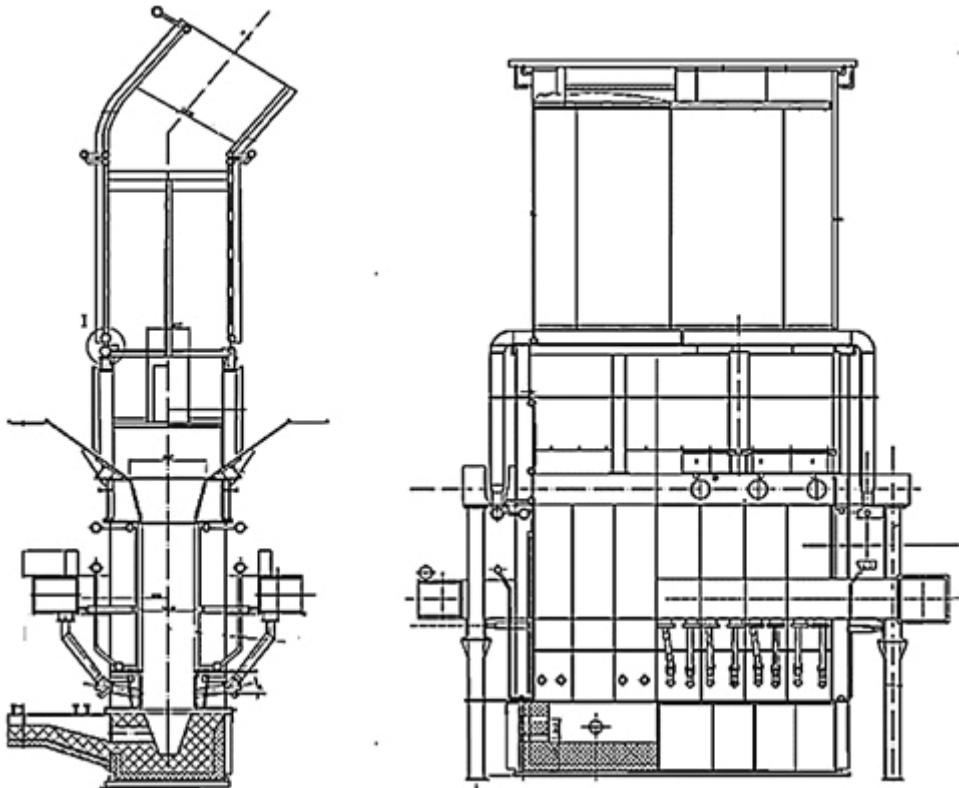


Рис. 4.1. Поперечный и продольный разрезы шахтной печи медной плавки

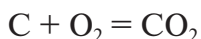
В нижней части печи, по всей длине, с обеих сторон расположены фурмы, через которые подают дутье. Область фурм называется «фоку-

сом печи», т. к. здесь происходит сгорание топлива и, как следствие, температура поднимается до 1300–1500 °С. Это зона самых высоких температур в шахтной печи, и в ней идут основные химические превращения и плавление шихты.

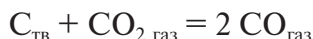
В результате плавки первичного сырья (концентратов и руды) образуются жидкие продукты плавки — шлак и штейн, а при совместной плавке первичного и вторичного сырья с повышенным содержанием в шихте ломов (10–20 % и более) — шлак, штейн и черная медь. Содержание меди в черной меди — около 80 %, в штейне — 30–40 %. Продукты плавки скапливаются в самой нижней части печи — внутреннем горне, откуда непрерывно перетекают во внешний (передний) горн, который дополнительно отапливается. Черная медь и штейн образуют сульфидно-металлический расплав, но т. к. черная медь имеет большую плотность, чем штейн, то при отстаивании продуктов плавки, скапливается в нижней части внешнего горна. Количество ее невелико (4–6 % от массы шихты при доле ломов в шихте 10–20 %) и зависит от количества ломов в шихте. Выпускают черную медь из горна вместе со штейном и отправляют на конвертирование как совместный продукт — сульфидно-металлический расплав. Однако в расчетах количество и состав черной меди учитывают отдельно от штейна. Шлак из горна сливают отдельно от сульфидно-металлического расплава; его направляют на шлаковый двор для охлаждения, а затем на обогатительную фабрику, где шлак дробят, измельчают и путем флотации получают шлаковый концентрат.

Плавка вторичного медьсодержащего сырья совместно с первичным сульфидным идет в слабовосстановительной атмосфере. Поскольку в шихту часто входят отходы латуни, биметаллические отходы, оборотные шлаки и другое сырье со значительным содержанием цинка, то дополнительной задачей такой шахтной плавки является отгонка летучих соединений свинца и цинка в газовую фазу для отделения их от меди. Получаемые цинксодержащие пыли являются еще одним продуктом процесса. В этом случае топливо — кокс — играет одновременно роль топлива и восстановителя.

В области фурм — зоне самых высоких температур в печи — происходит сгорание кокса



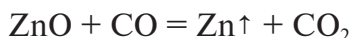
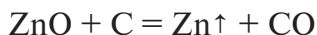
Оксид углерода СО обладает сильными восстановительными свойствами, но содержание его в газах невелико: соотношение «СО : СО<sub>2</sub>» зависит от условий сжигания кокса и распределения газового потока в шахте печи. Горячие газы поднимаются вверх по шахте печи, пронизывая весь столб шихты, и нагревают шихту и кокс, загружаемый вместе с шихтой. Кокс раскаляется и, при температуре 800 °С и выше, взаимодействует с диоксидом углерода



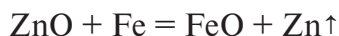
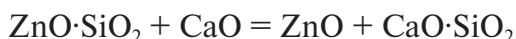
Тепла поднимающихся вверх газов достаточно для нагревания кокса, расплавления наиболее легкоплавких компонентов шихты и для отгонки восстановленных цинка и свинца в газовую фазу.

Температура перехода металлического цинка в газообразное состояние составляет 960 °С, поэтому в шахтной печи, при температуре выше 1000 °С, в условиях слабовосстановительной атмосферы, металлический цинк из ломов переходит в газообразное состояние и уносится из печи.

Цинк, присутствующий в шихте в виде оксида, в этих условиях восстанавливается и переходит в газ. Восстановителями для оксида цинка являются кокс и продукт его горения СО

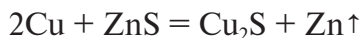


Однако из-за низкого содержания СО в газах и необходимости непосредственного контакта твердого кокса и оксида цинка, доля этих реакций в общем процессе возгонки цинка в шахтной печи невелика. Основное восстановление оксида цинка происходит при температуре выше 1000 °С с помощью флюсов СаО и металлического железа, входящего в состав вторичных материалов. В этом случае цинк восстанавливается даже из трудновосстановимых соединений — силикатов и ферритов:



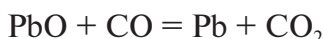


Металлическая медь, входящая в состав вторичного сырья, частично вытесняет цинк из сульфидов, в виде которых цинк находится в первичном сырье,



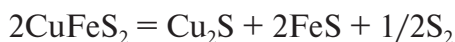
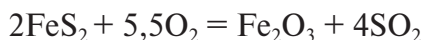
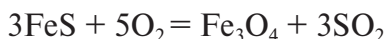
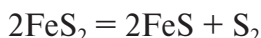
Таким образом, основная часть цинка возгоняется, но часть переходит в шлак, поэтому шлаки такой плавки содержат повышенное количество цинка — от 3—5 до 12 % в зависимости от количества цинк-содержащих ломов и отходов в шихте. Около 60 % цинка в шлаках содержится в виде силиката  $\text{ZnO}\cdot\text{SiO}_2$ , примерно 40 % — в виде шпинели  $\text{ZnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ . Высокое содержание в шлаках тугоплавкой шпинели  $\text{ZnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  (температура плавления около 1900 °С) приводит к повышению вязкости шлаков и отрицательно влияет на потери меди со шлаками. Часть сульфида цинка переходит в штейн.

Свинец, присутствующий в шихте в виде свободного оксида, легко восстанавливается и частично возгоняется



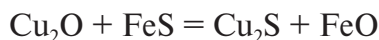
Силикаты свинца, приходящие со вторичным сырьем, плавятся уже при температуре около 750 °С, образуя оксиды свинца, которые также восстанавливаются. Небольшое количество свинца теряется со шлаком, часть сульфида свинца переходит в штейн, часть возгоняется.

Сульфиды меди и железа, содержащиеся в первичном сырье, при высоких температурах подвергаются термической диссоциации и окислению по реакциям

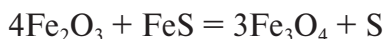


Образовавшиеся сульфиды меди  $\text{Cu}_2\text{S}$  и железа  $\text{FeS}$  образуют штейн.

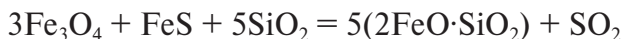
Оксиды меди, содержащиеся во вторичных материалах, реагируют с сульфидом железа, а т.к. сродство к сере у меди гораздо выше, чем у железа, медь сульфидируется, и сульфид меди также переходит в штейн



Образовавшиеся в результате диссоциации сульфидов соединения железа частично реагируют между собой с образованием магнетита



Образующийся магнетит вступает в реакцию с сульфидом железа и кварцевым флюсом и переходит в шлак в виде фаялита



Практика совместной плавки первичного и вторичного сырья показала, что оптимальным является получение шлака с содержанием 24–26 %  $\text{SiO}_2$ ; 40–48 %  $\text{FeO}$  и 8–12 %  $\text{CaO}$ . Такой состав шлака позволяет снизить механические потери меди со шлаком, а цинк максимально перевести в газовую фазу. Для получения шлаков заданного состава, в состав шихты вводят флюсы — кварц и известняк. Частично роль флюсов выполняют бедные руды с невысоким содержанием меди, но повышенным содержанием кремнезема, а также золотосодержащие концентраты.

Цинк и свинец, переходящие в газообразное состояние, выйдя из восстановительной атмосферы печи и зоны высоких температур, окисляются и конденсируются, образуя тонкие пыли (возгоны). Размер возгонов составляет менее 1 мкм. В условиях плавки сырья с высоким содержанием цинка, основную массу возгонов составляет  $\text{ZnO}$ . Возгоны улавливают в рукавных фильтрах и отправляют на переработку — извлечение цинка.

## **4.1. Расчет материального баланса совместной плавки первичного и вторичного сырья**

### **4.1.1. Предварительный расчет шихты без флюсов**

В шихту шахтной плавки входят следующие медьсодержащие компоненты:

- брикет — окускованная смесь мелкодисперсных материалов: сульфидных медных концентратов различных обогатительных фабрик, шлакового концентрата, оборотных пылей циклонов (шахтных печей и конвертеров) и т. п.;

- свинцово-сурьмяный кек — полупродукт цинкового производства;
- оборотный шлак — шлак конвертеров;
- клинкер — остаток от вельцевания цинковых кеков;
- вторичное сырье — стружка, латунные лома, радиаторы и т. п.;
- руда — куски медной руды размером 100–200 мм.

Химический и фазовый составы медьсодержащих компонентов шихты приведены в табл. 4.1 и 4.2 соответственно.

Таблица 4.1

**Химический состав компонентов шихты**

Материал	Содержание, %								
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Пр.
Брикет	15,85	3,95	0,95	29,34	25,31	11,83	1,10	1,30	10,37
Кек Pb — Sb	2,50	0,43	69,04	—	—	—	—	—	28,03
Руда гайская	3,00	1,45	—	36,31	43,09	9,97	4,03	0,24	1,90
Шлак конвертеров	2,50	3,76	0,35	47,40	0,19	21,45	1,33	2,28	20,74
Стружка, лом	70,00	24,00	1,00	3,26	—	—	—	—	1,74
Клинкер	12,82	2,24	—	12,38	4,13	18,52	5,40	4,20	40,31
Руда сафьяновская	1,59	0,56	—	14,09	16,81	49,3	8,10	1,11	8,43

Таблица 4.2

**Основные соединения компонентов шихты**

Материал	Основные соединения	Распределение меди, %
Брикет	Cu <sub>2</sub> S, CuS, CuFeS <sub>2</sub> , Cu <sub>2</sub> O, ZnS, ZnO, 2ZnO·SiO <sub>2</sub> , ZnO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , PbS, PbO, FeS, FeS <sub>2</sub> , 2FeO·SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeO, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, CaCO <sub>3</sub> .	CuFeS <sub>2</sub> — 28, Cu <sub>2</sub> S — 54, CuS — 4,8
Кек Pb — Sb	Cu <sub>2</sub> O, ZnO, Pb <sub>мет</sub>	Cu <sub>2</sub> O — 100
Руда гайская	CuFeS <sub>2</sub> , CuS, FeS <sub>2</sub> , ZnS, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	CuFeS <sub>2</sub> — 60, CuS — 40
Оборотный конвертерный шлак	Cu <sub>2</sub> S, Cu <sub>2</sub> O, Cu <sub>мет</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , PbO, ZnO, 2FeO·SiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	Cu <sub>2</sub> S — 30, Cu <sub>2</sub> O — 60, Cu <sub>мет</sub> — 10
Стружка, лом	Cu <sub>мет</sub> , Fe <sub>мет</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pb <sub>мет</sub> , Zn <sub>мет</sub>	Cu <sub>мет</sub> — 100
Клинкер	Cu <sub>2</sub> S, FeS, Fe <sub>мет</sub> , FeO, ZnO, C, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	Cu <sub>2</sub> S — 100
Руда сафьяновская	CuFeS <sub>2</sub> , CuS, FeS <sub>2</sub> , ZnS, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	CuFeS <sub>2</sub> — 60, CuS — 40

На первом этапе расчета материального баланса рассчитываем рациональный состав каждого компонента шихты по методике, рассмотренной в гл. 1 «Расчет шихты». Расчеты рационального состава каждого компонента выполняются на 100 кг сухого материала по данным химического и фазового анализов (см. табл. 4.1 и 4.2). Результаты расчета заносим в табл. 4.3–4.9.

Таблица 4.3

## Рациональный состав брикетов

Соединения	Элементы, %										ВСЕ-ГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
CuFeS <sub>2</sub>	4,41	—	—	3,87	4,46	—	—	—	—	—	12,74
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	12,41	14,27	—	—	—	—	—	26,68
Cu <sub>2</sub> S	8,56	—	—	—	2,16	—	—	—	—	—	10,72
CuS	0,76	—	—	—	0,39	—	—	—	—	—	1,15
Cu <sub>2</sub> O	2,12	—	—	—	—	—	—	—	0,28	—	2,4
ZnS	—	1,88	—	—	0,93	—	—	—	—	—	2,81
2ZnO·SiO <sub>2</sub>	—	0,08	—	—	—	0,04	—	—	0,02	—	0,14
ZnO	—	1,96	—	—	—	—	—	—	0,48	—	2,44
PbO	—	—	0,61	—	—	—	—	—	0,06	—	0,67
PbS	—	—	0,34	—	0,05	—	—	—	—	—	0,39
ZnO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,03	—	0,05	—	—	—	—	0,03	—	0,11
2FeO·SiO <sub>2</sub>	—	—	—	3,7	—	1,99	—	—	1,06	—	6,75
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	0,43	—	—	—	—	0,16	—	0,59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	1,93	—	—	—	—	0,71	—	2,64
FeO	—	—	—	1,62	—	—	—	—	0,46	—	2,08
FeS	—	—	—	5,32	3,06	—	—	—	—	—	8,38
MgO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,13	0,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	1,1	—	—	—	1,1
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	9,8	—	—	—	—	9,8
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	1,3	—	1,02	2,32
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,96	5,96
ИТОГО	15,85	3,95	0,95	29,33	25,32	11,83	1,1	1,3	3,26	7,11	100,00

Таблица 4.4

**Рациональный состав гайской руды**

Соединения	Элементы, %									ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Пр.	
CuFeS <sub>2</sub>	1,80	—	—	1,58	1,82	—	—	—	—	5,20
CuS	1,20	—	—	—	0,61	—	—	—	—	1,81
ZnS	—	1,45	—	—	0,71	—	—	—	—	2,16
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	34,73	39,96	—	—	—	—	74,69
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	9,97	—	—	—	9,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	4,03	—	—	4,03
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	0,24	0,19	0,43
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	1,71	1,71
ИТОГО	3,00	1,45	0,00	36,31	43,10	9,97	4,03	0,24	1,90	100,00

Таблица 4.5

**Рациональный состав сафьяновской руды**

Соединения	Элементы, %									ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Пр.	
CuFeS <sub>2</sub>	0,95	—	—	0,83	0,96	—	—	—	—	2,75
CuS	0,64	—	—	—	0,32	—	—	—	—	0,96
ZnS	—	0,56	—	—	0,27	—	—	—	—	0,83
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	13,26	15,26	—	—	—	—	28,52
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	49,30	—	—	—	49,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	8,10	—	—	8,10
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	1,11	0,87	1,98
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	7,56	7,56
ИТОГО	1,59	0,56	0,00	14,09	16,81	49,30	8,10	1,11	8,43	100,00

Таблица 4.6

**Рациональный состав клинкера**

Соединения	Элементы, %										ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
Cu <sub>2</sub> S	12,82	—	—	—	3,24	—	—	—	—	—	16,06
ZnO	—	2,24	—	—	—	—	—	—	0,55	—	2,79
Fe <sub>мет</sub>	—	—	—	2,48	—	—	—	—	—	—	2,48
FeO	—	—	—	8,35	—	—	—	—	2,39	—	10,74
FeS	—	—	—	1,55	0,89	—	—	—	—	—	2,44
C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11,70	11,70

Окончание табл. 4.6

Соединения	Элементы, %										ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	5,40	—	—	—	5,40
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	18,52	—	—	—	—	18,52
CaO	—	—	—	—	—	—	—	4,20	—	—	4,20
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25,67	25,67
ИТОГО	12,82	2,24	0,00	12,38	4,13	18,52	5,40	4,20	2,94	37,37	100,00

Таблица 4.7

## Рациональный состав лома цветных металлов

Соединения	Элементы, %						ВСЕГО
	Cu	Fe	Zn	Pb	O <sub>2</sub>	Пр.	
Cu <sub>мет</sub>	70,00	—	—	—	—	—	70,00
Fe <sub>мет</sub>	—	3,10	—	—	—	—	3,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,16	—	—	0,06	—	0,22
Pb <sub>мет</sub>	—	—	—	1,00	—	—	1,00
Zn <sub>мет</sub>	—	—	24,00	—	—	—	24,00
Прочие	—	—	—	—	—	1,68	1,68
ИТОГО	70,00	3,26	24,00	1,00	0,06	1,68	100,00

Таблица 4.8

## Рациональный состав конвертерного шлака

Соединения	Элементы, %										ВСЕ-ГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
Cu <sub>2</sub> S	0,75	—	—	—	0,19	—	—	—	—	—	0,94
Cu <sub>2</sub> O	1,50	—	—	—	—	—	—	—	0,19	—	1,69
Cu <sub>мет</sub>	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,25
PbO	—	—	0,35	—	—	—	—	—	0,03	—	0,38
ZnO	—	3,76	—	—	—	—	—	—	0,92	—	4,68
2FeO·SiO <sub>2</sub>	—	—	—	38,72	—	20,82	—	—	11,10	—	70,64
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	8,68	—	—	—	—	3,32	—	12,00
FeS	—	—	—	—	0,00	—	—	—	—	—	0,00
MgO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	1,33	—	—	—	1,33
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	0,63	—	—	—	—	0,63
CaO	—	—	—	—	—	—	—	2,28	—	—	2,28
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,19	5,19
ИТОГО	2,50	3,76	0,35	47,40	0,19	21,45	1,33	2,28	15,56	5,19	100,00

Таблица 4.9

**Рациональный состав кека Pb–Sb**

Соединения	Элементы, %					ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	O <sub>2</sub>	Прочие	
Cu <sub>2</sub> O	2,50	—	—	0,31	—	2,81
ZnO	—	0,43	—	0,11	—	0,54
Pb	—	—	69,04	—	—	69,04
Прочие	—	—	—	—	27,61	27,61
ИТОГО	2,50	0,43	69,04	0,42	27,61	100,00

Далее выполняем расчет общего рационального состава медьсодержащей шихты.

Соотношение медьсодержащих компонентов шихты приведено в табл. 4.10.

Таблица 4.10

**Состав шихты на плавку (без флюсов)**

Вид материала	Материал	Доля в шихте, %
Сульфидное сырье	Брикет	47,30
Техногенное сырье	Кек Pb – Sb	1,20
Первичное сырье	Руда гайская	8,50
Техногенное сырье	Оборотный шлак конвертеров	17,50
Вторичное сырье	Стружка, лом	10,30
Техногенное сырье	Клинкер	6,00
Первичное сырье	Руда сафьяновская	9,20
ИТОГО		100,00

На основе полученных результатов расчета рационального состава отдельных компонентов (см. табл. 4.3–4.9) и доли каждого из них в шихте (см. табл. 4.10) рассчитываем рациональный состав шихты на плавку. Расчет ведем на 100 кг шихты по методике, рассмотренной в гл. 1 «Расчет шихты». Результаты расчета рационального состава медьсодержащей шихты шахтной плавки без флюсов приведены в табл. 4.11.

Поскольку расчет вели на 100 кг шихты (100 кг шихты = 100 % шихты), то строка «Итого» даст нам также химический состав шихты по основным компонентам.

Таблица 4.11

## Рациональный состав шихты, кг

Соединения	Элементы, кг											ВСЕ-ГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Пр.	
CuFeS <sub>2</sub>	2,33	—	—	2,05	2,36	—	—	—	—	—	—	6,74
Cu <sub>2</sub> S	0,53	—	—	—	0,13	—	—	—	—	—	—	0,66
CuS	4,72	—	—	—	2,39	—	—	—	—	—	—	7,11
Cu <sub>2</sub> O	1,45	—	—	—	—	—	—	—	0,18	—	—	1,63
Cu <sub>мет</sub>	7,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,26
FeS	—	—	—	2,56	1,47	—	—	—	—	—	—	4,03
ZnO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,02	—	0,03	—	—	—	—	0,02	—	—	0,07
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	1,72	—	—	—	—	0,66	—	—	2,38
2FeO·SiO <sub>2</sub>	—	—	—	9,11	—	4,90	—	—	2,61	—	—	16,62
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	9,97	11,47	—	—	—	—	—	—	21,44
Fe <sub>мет</sub>	—	—	—	0,34	—	—	—	—	—	—	—	0,34
FeO	—	—	—	0,94	—	—	—	—	0,27	—	—	1,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	0,91	—	—	—	—	0,39	—	—	1,30
ZnS	—	1,08	—	—	0,53	—	—	—	—	—	—	1,61
ZnO	—	1,75	—	—	—	—	—	—	0,43	—	—	2,18
Zn <sub>мет</sub>	—	2,46	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,46
PbS	—	—	0,30	—	0,05	—	—	—	—	—	—	0,35
PbO	—	—	0,33	—	—	—	—	—	0,03	—	—	0,36
Pb <sub>мет</sub>	—	—	0,81	—	—	—	—	—	—	—	—	0,81
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	11,26	—	—	—	—	—	11,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	2,16	—	—	—	—	2,16
CaO	—	—	—	—	—	—	—	0,75	—	—	—	0,75
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	0,64	—	0,50	—	1,14
C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,95
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,18	5,18
ИТОГО	16,29	5,31	1,44	27,63	18,40	16,16	2,16	1,39	4,59	0,50	6,13	100,00

## 4.1.2. Расчет количества и состава штейна и черной меди

В результате плавки сложной шихты получаем два основных продукта, в которые переходит основная часть меди из шихты: черную медь — расплав металлической меди и других металлов и штейн — расплав сульфидов, основу которого составляют сульфид меди Cu<sub>2</sub>S



и сульфид железа FeS. Эти продукты образуют сульфидно-металлический расплав; их удаляют из печи и в дальнейшем перерабатывают совместно, но составы и выход их совершенно различны, поэтому в расчете материального баланса рассчитываем их отдельно.

Расчет ведем на 100 кг шихты. Исходя из производственных данных (см. табл. 2.2) принимаем общее извлечение меди в штейн и черную медь 97 %. Содержание меди в шихте (см. табл. 4.11) — 16,29 %. Поскольку расчет ведем на 100 кг шихты, масса меди в шихте — 16,29 кг.

Масса меди, перешедшей в штейн и черную медь, составит

$$16,29 \cdot 97/100 = 15,80 \text{ кг.}$$

Практика ведения процесса шахтной плавки показала, что в штейн переходит 85 % меди от этого количества, в черную медь — 15 %. Соответственно масса меди в этих продуктах составит

$$15,80 \cdot 85/100 = 13,43 \text{ кг в штейне;}$$

$$15,80 \cdot 15/100 = 2,37 \text{ кг в черной меди.}$$

Состав черной меди зависит от состава вторичного сырья и растворимости металлов в меди при температуре 1100–1200 °С. Анализ производственных данных дает усредненный состав черной меди, приведенный в табл. 4.12.

Таблица 4.12

**Усредненный состав черной меди по практическим данным**

Компонент	Формула	Содержание, %
Медь	Cu	80,00
Железо	Fe	5,00
Свинец	Pb	4,00
Цинк	Zn	4,00
Сера	S	1,00
Прочие	—	6,00
ВСЕГО	—	100,00

Масса меди в черной меди — 2,37 кг, содержание меди в черной меди — 80 % (см. табл. 4.12), тогда масса черной меди составит

$$2,37 \cdot 100/80 = 2,96 \text{ кг.}$$

Массы остальных составляющих черной меди определим, зная ее массу и состав (см. табл. 4.12). Масса железа в черной меди составит

$$2,96 \cdot 5/100 = 0,15 \text{ кг},$$

где 2,96 — масса черной меди, кг;

5 — содержание железа в черной меди, % (см. табл. 4.12).

Массы остальных составляющих рассчитываем аналогично расчету массы железа, полученные данные сводим в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Состав черной меди

Показатель	Компонент						ИТОГО
	Cu	Fe	Pb	Zn	S	Пр.	
Содержание, %	80,00	5,00	4,00	4,00	1,00	6,00	100,00
Масса, кг	2,37	0,15	0,12	0,12	0,03	0,17	2,96

При шахтной плавке получают штейны с содержанием меди на уровне 25–40 % (см. табл. 2.2), но практика работы по совместной плавке первичного и вторичного сырья показала, что появление черной меди в расплаве наблюдается при содержании меди в штейне около 40 %. Принимаем содержание меди в штейне 40 %, тогда масса штейна составит

$$13,43 \text{ кг меди} — 40 \%;$$

$$M_{\text{шт}} — 100 \%;$$

$$13,43 \cdot 100/40 = 33,58 \text{ кг}.$$

Согласно правилу В. Я. Мостовича содержание серы в штейне примем 24 %; тогда масса серы в штейне составит

$$33,58 \cdot 0,24 = 8,06 \text{ кг}.$$

В  $\text{Cu}_2\text{S}$  связано серы



$$13,43 \cdot 32/(63,5 \cdot 2) = 3,38 \text{ кг},$$

где 13,43 — масса меди в штейне, кг;

32 — атомная масса серы, г/моль;

63,5 — атомная масса меди, г/моль.

В штейн переходит часть сульфидного цинка. Содержание  $\text{ZnS}$  в шихте — 1,61 % (см. табл. 4.11), т. е. в 100 кг шихты — 1,61 кг  $\text{ZnS}$ . Масса цинка в  $\text{ZnS}$  составляет 1,08 кг (см. табл. 4.11). На основании производственных данных принимаем, что 49 % содержащегося в шихте сульфидного цинка переходит в штейн; тогда масса цинка, перешедшего в штейн, составит

$$1,08 \cdot 49/100 = 0,53 \text{ кг.}$$

Цинк в штейне остается в виде сульфида  $\text{ZnS}$ . Следовательно, масса серы, связанной с цинком, составит



$$0,53 \cdot 32/65,4 = 0,26 \text{ кг.}$$

Сульфидный свинец также частично перейдет в штейн в виде сульфида. Содержание  $\text{PbS}$  в шихте — 0,35 % (см. табл. 4.11), в 100 кг шихты масса свинца в  $\text{PbS}$  составляет 0,3 кг (см. табл. 4.11). На основании производственных данных принимаем, что 47 % содержащегося в шихте сульфидного свинца переходит в штейн. Масса свинца, перешедшего в штейн, составит

$$0,3 \cdot 47/100 = 0,14 \text{ кг.}$$

Масса серы, связанной со свинцом, составит



$$0,14 \cdot 32/207 = 0,02 \text{ кг.}$$

На долю  $\text{FeS}$  останется серы

$$8,06 - 3,38 - 0,26 - 0,02 = 4,40 \text{ кг.}$$

С этим количеством серы будет связано Fe

$$55,8 \cdot 4,40/32 = 7,67 \text{ кг.}$$

В состав штейна всегда входит кислород. Количество кислорода можно определить по табл. 2.3. При содержании меди в штейне 40 %,

содержание кислорода в штейне составит 3,02 %. В таком случае масса кислорода в 33,58 кг штейна составит

$$33,58 \cdot 3,02/100 = 1,01 \text{ кг.}$$

Кислород в штейне присутствует в виде магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Определяем массу железа в магнетите



$$(55,8 \cdot 3 \cdot 1,01)/(16 \cdot 4) = 2,64 \text{ кг.}$$

Все полученные данные заносим в таблицу рационального состава штейна и рассчитываем его химический состав (табл. 4.14).

Таблица 4.14

Рациональный состав штейна

Соединения	Элементы, кг							ВСЕ-ГО
	Cu	Fe	Pb	Zn	O <sub>2</sub>	S	Пр.	
Cu <sub>2</sub> S	13,43	—	—	—	—	3,38	—	16,81
FeS	—	7,67	—	—	—	4,4	—	12,07
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	2,64	—	—	1,01	—	—	3,66
PbS	—	—	0,14	—	—	0,02	—	0,16
ZnS	—	—	—	0,53	—	0,26	—	0,79
Прочие	—	—	—	—	—	—	0,1	0,09
ИТОГО	13,43	10,31	0,14	0,53	1,01	8,06	0,1	33,58
Содержание, %	40,00	30,70	0,42	1,58	3,01	24,00	0,30	100,00

В состав прочих входят растворенные в штейне благородные металлы, шлаковые включения и другие неучтенные компоненты.

### 4.1.3. Расчет пылевыноса

В процессе шахтной плавки из печи уносятся грубые и тонкие пыли. В циклонах улавливают грубые пыли и возвращают их в процесс: они входят в состав брикетов. Тонкие пыли — возгоны — улавливают в электрофильтрах и перерабатывают отдельно.

Сначала рассчитаем количество грубых пылей. Пылевынос при шахтной плавке принимаем 1,5 % от массы шихты (см. табл. 2.2). Считаем, что компоненты шихты покидают печь, не успев вступить в химические реакции. Масса грубой пыли при плавке 100 кг шихты составит

$$100 \cdot 1,5/100 = 1,5 \text{ кг.}$$

Массу отдельных элементов в пыли рассчитываем по формуле

$$m_{\text{пыль}}^i = m_{\text{ших}}^i \cdot 1,5/100,$$

где  $m_{\text{ших}}^i$  — масса элемента в шихте, кг (см. табл. 4.11).

Масса меди в пыли составит

$$16,29 \cdot 1,5/100 = 0,24 \text{ кг,}$$

где 16,29 — масса меди в 100 кг шихты, кг (см. табл. 4.11).

Массы остальных компонентов рассчитываем аналогично расчету для меди и результаты заносим в табл. 4.15.

Таблица 4.15

Состав грубой пыли

Показатель	Компонент											ИТО-ГО
	Cu	Fe	Pb	Zn	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Пр.	
Масса, кг	0,24	0,41	0,02	0,08	0,28	0,24	0,03	0,02	0,07	0,01	0,1	1,50
Содержание, %	16,00	27,33	1,33	5,33	18,67	16,00	2,00	1,33	4,67	0,67	6,67	100,00

Далее рассчитываем технологические газы и тонкие пыли. В составе шихты есть компоненты, которые при плавке переходят в газовую фазу и образуют технологические газы. В первую очередь это сера и диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), входящий в состав кальцита CaCO<sub>3</sub>. При нагревании происходит диссоциация CaCO<sub>3</sub> по реакции



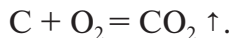
Рассчитываем массу CO<sub>2</sub>, перешедшего в газ,

$$0,5 - 0,01 = 0,49 \text{ кг,}$$

где 0,5 — масса CO<sub>2</sub> в шихте, кг (см. табл. 4.11);

0,01 — масса CO<sub>2</sub> в грубой пыли, кг (см. табл. 4.15).

Кроме того, в составе шихты есть клинкер, содержащий углерод. Масса углерода, приходящего с клинкером, — 0,95 кг (см. табл. 4.11). При плавке углерод сгорает, переходя в газ в виде  $\text{CO}_2$ , по реакции



Масса углерода, перешедшего в газ, с учетом 1 %, вынесенного с грубой пылью, составит

$$0,95 - 0,95 \cdot 0,01 = 0,94 \text{ кг.}$$

Такое количество углерода образует оксида

$$0,94 \cdot 44/12 = 3,4 \text{ кг } \text{CO}_2,$$

где 44 и 12 — атомные массы  $\text{CO}_2$  и углерода соответственно, г/моль.

Общая масса  $\text{CO}_2$  в газовой фазе составит

$$0,49 + 3,4 = 3,89 \text{ кг.}$$

Рассчитываем массу серы, перешедшей в газ. Сера распределяется между черной медью, штейном, газом, пылью и шлаком.

Масса серы в шихте — 18,4 кг (см. табл. 4.11).

Масса серы в черной меди — 0,03 кг (см. табл. 4.13).

Масса серы в штейне — 8,06 кг (см. табл. 4.14).

Масса серы в грубой пыли — 0,28 кг (см. табл. 4.15).

Массу серы в шлаке рассчитаем через массу меди в шлаке, т. к. сера в шлаке присутствует в виде мелких капелек штейна, не успевших отстояться. Медь при плавке распределяется между штейном, черной медью, грубой пылью и шлаком.

Масса меди в шихте — 16,29 кг (см. табл. 4.11).

Масса меди в штейне и черной меди — 15,80 кг.

Масса меди в грубой пыли — 0,24 кг (см. табл. 4.15).

В шлак переходит меди

$$16,29 - 15,80 - 0,24 = 0,25 \text{ кг.}$$

Медь в шлаке присутствует в виде оксида и сульфида меди в соотношении примерно 1:1. Таким образом, масса сульфидной меди составит

$$0,25/2 = 0,125 \text{ кг.}$$

С этим количеством меди будет связано серы



$$0,125 \cdot 32 / (63,5 \cdot 2) = 0,03 \text{ кг.}$$

Остальная сера перейдет в газ

$$18,40 - 0,03 - 8,06 - 0,28 - 0,03 = 10,0 \text{ кг.}$$

Степень десульфуризации составит

$$10 \cdot 100 / 18,40 = 54,35 \text{ \%}.$$

В тонкие пыли (возгоны) при плавке частично перейдет свинец и цинк. Свинец распределяется между тонкими пылями и шлаком примерно поровну, а цинк — в соотношении 2:1.

Масса свинца в шихте — 1,44 кг (см. табл. 4.11).

Масса свинца в черной меди — 0,12 кг (см. табл. 4.13).

Масса свинца в штейне — 0,14 кг (см. табл. 4.14).

Масса свинца в грубой пыли — 0,02 кг (см. табл. 4.15).

В таком случае масса оставшегося свинца составит

$$1,44 - 0,12 - 0,14 - 0,02 = 1,16 \text{ кг.}$$

В тонкие пыли перейдет половина от этого количества

$$1,16 / 2 = 0,58 \text{ кг.}$$

В шлак также перейдет 0,58 кг свинца.

Масса цинка в шихте — 5,31 кг (см. табл. 4.11).

Масса цинка в черной меди — 0,12 кг (см. табл. 4.13).

Масса цинка в штейне — 0,53 кг (см. табл. 4.14).

Масса цинка в грубой пыли — 0,08 кг (см. табл. 4.15).

В таком случае масса оставшегося цинка составит

$$5,31 - 0,12 - 0,53 - 0,08 = 4,58 \text{ кг.}$$

В тонкие пыли перейдет 2/3 цинка от этого количества

$$4,58 \cdot 2/3 = 3,05 \text{ кг.}$$

В шлак перейдет 1/3 цинка

$$4,58 - 3,05 = 1,53 \text{ кг.}$$

Состав технологических газов и тонких пылей сводим в табл. 4.16.

Таблица 4.16

Состав технологических газов и тонких пылей, кг

Продукт	Компонент				ИТОГО
	Zn	Pb	S	CO <sub>2</sub>	
Технологический газ	—	—	10,00	3,94	13,94
Тонкие пыли	3,05	0,58	—	—	3,63

#### 4.1.4. Предварительный расчет массы и состава шлака

Массы элементов шлака при бесфлюсовой плавке определяем по разности между их массой в исходной шихте и в продуктах — черной меди, штейне, грубой и тонкой пыли, технологических газах

$$m_{\text{шлак}}^i = m_{\text{шихта}}^i - m_{\text{черная медь}}^i - m_{\text{штейн}}^i - m_{\text{гр. пыль}}^i - m_{\text{тон. пыль}}^i - m_{\text{техн. газ}}^i$$

Расчет ведем на основании данных табл. 4.11, 4.13–4.16.

Массы меди, свинца, цинка и серы в шлаке уже рассчитаны при расчете состава газа и тонкой пыли.

Масса железа в шлаке составит

$$27,63 - 0,15 - 10,31 - 0,41 = 16,76 \text{ кг,}$$

где 27,63 — масса железа в шихте, кг (см. табл. 4.11);

0,15 — масса железа в черной меди, кг (см. табл. 4.13);

10,31 — масса железа в штейне, кг (см. табл. 4.14);

0,41 — масса железа в грубой пыли, кг (см. табл. 4.15).

Массы остальных компонентов рассчитываем аналогично предыдущему расчету. Полученные данные сводим в табл. 4.17.

Таблица 4.17

Состав шлака

Компонент	Формула	Масса, кг
Медь	Cu	0,25
Железо	Fe	16,76
Свинец	Pb	0,58
Цинк	Zn	1,53



Окончание табл. 4.17

Компонент	Формула	Масса, кг
Сера	S	0,03
Кремнезем	SiO <sub>2</sub>	15,92
Глинозем	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,13
Оксид кальция	CaO	1,37
Кислород	O	3,51
Прочие	—	2,29
ВСЕГО		44,37

Полученные данные не показывают химический состав шлака, который необходим для расчета флюсов. Поэтому рассчитываем химический состав шлака. Содержание каждого элемента в шлаке определяем по формуле

$$C_{\text{шлак}}^i = m_{\text{шлак}}^i \cdot 100 / M_{\text{шлак}},$$

где  $m_{\text{шлак}}^i$  — масса отдельного элемента в шлаке, кг (см. табл. 4.17);

$M_{\text{шлак}}$  — общая масса шлака, кг.

В нашем случае  $M_{\text{шлак}} = 44,37$  кг (см. табл. 4.17).

Содержание меди в шлаке составит

$$0,24 \cdot 100 / 44,37 = 0,54 \, \%.$$

Содержание остальных компонентов рассчитываем аналогично описанному, получаем химический состав шлака (табл. 4.18).

Таблица 4.18

Химический состав шлака бесфлюсовой плавки, %

Компонент	Формула	Содержание, %
Медь	Cu	0,54
Железо	Fe	37,76
Свинец	Pb	1,31
Цинк	Zn	3,45
Сера	S	0,07
Кремнезем	SiO <sub>2</sub>	35,89
Глинозем	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,80
Оксид кальция	CaO	3,09
Кислород	O	7,89
Прочие	—	5,20
ВСЕГО		100,00

На основании всех полученных данных составляем предварительный материальный баланс плавки без флюсов и дутья (табл. 4.19).

Невязка баланса составила 0,02 %. Такое расхождение образовалось за счет округления значений, оно является допустимым.

#### 4.1.5. Расчет количества флюсов

Рассчитанный шлак при плавке шихты без флюсов и дутья содержит 16,71 кг железа и 3,5 кг кислорода (табл. 5.18–5.19). Железо в шлаке находится в виде оксидов — магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и fayalита  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ . Масса шлака — 44,37 кг. Прежде чем рассчитывать количество флюсов, необходимо скорректировать рассчитанную массу шлака с учетом кислорода, который необходим для окисления всего железа шлака. Выбранные флюсы не содержат железа (табл. 4.20), поэтому масса железа в шлаке после добавки флюсов не изменится.

Таблица 4.20

Химический состав флюсов, %

Материал	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{CO}_2$	Прочие	ИТОГО
Кварц	92,00	2,00	—	—	6,00	100,00
Известняк	3,57	—	54,00	42,43	—	100,00

Другие металлы шлака также находятся в виде оксидов. Сначала определим количество кислорода, связанное с цинком и свинцом. Цинк и свинец переходят в шлак в виде оксидов  $\text{ZnO}$  и  $\text{PbO}$ . Масса цинка в шлаке — 1,53 кг (см. табл. 4.17). С этим количеством цинка связано кислорода

$$1,53 \cdot 16/65,4 = 0,37 \text{ кг},$$

где 16 и 65,4 — атомные массы кислорода и цинка соответственно, г/моль.

Масса свинца в шлаке — 0,58 кг (см. табл. 4.17). С этим количеством свинца связано кислорода

$$0,58 \cdot 16/207,2 = 0,04 \text{ кг},$$

где 16 и 207,2 — атомные массы кислорода и свинца соответственно, г/моль.

По данным технической литературы [1–3] и практики работы предприятий примем, что 95 % железа в шлаке содержится в виде fayalite  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ , остальные 5 % — в виде магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Масса железа в fayalite составит

$$16,75 \cdot 0,95 = 15,91 \text{ кг.}$$

В fayalite с железом связано кислорода

$$15,91 \cdot 16 \cdot 2 / (55,8 \cdot 2) = 4,56 \text{ кг.}$$

Масса железа в магнетите  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  составит

$$16,75 \cdot 0,05 = 0,84 \text{ кг.}$$

В магнетите с железом связано кислорода

$$0,84 \cdot 16 \cdot 4 / (55,8 \cdot 3) = 0,32 \text{ кг,}$$

где 16 и 55,8 — атомные массы кислорода и железа соответственно, г/моль.

Общая масса кислорода в шлаке для окисления всех компонентов должна быть

$$0,37 + 0,04 + 4,56 + 0,32 = 5,3 \text{ кг.}$$

С учетом уже имеющегося кислорода массой 3,5 кг (см. табл. 4.17), нужно добавить кислорода за счет дутья

$$5,3 - 3,5 = 1,80 \text{ кг.}$$

Масса шлака с учетом добавленного кислорода составит

$$44,37 + 1,80 = 46,17 \text{ кг.}$$

По данным технической литературы [6, 8] и практики работы предприятий, шлаки медной шахтной плавки должны удовлетворять следующим соотношениям основных шлакообразующих компонентов:

$$\text{FeO} : \text{SiO}_2 : \text{CaO} = (33-43) : (30-36) : (8-15).$$

Определим содержание этих оксидов в расчетном шлаке с учетом изменившейся массы шлака.

Масса  $\text{CaO}$  в исходном шлаке — 1,37 кг (см. табл. 4.17). Содержание  $\text{CaO}$  в скорректированном шлаке

$$1,37 \cdot 100 / 46,17 = 2,97 \text{ \%}.$$

Таблица 4.19

Предварительный материальный баланс

Материал	М, кг	Вы- ход, %	Cu		Zn		Pb		Fe		S		SiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		CaO		O <sub>2</sub>		CO <sub>2</sub>		Проч.	
			%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
ЗАГРУЖЕНО																								
Шихта	100,00	100,00	16,29	16,29	5,31	5,31	1,44	1,44	27,63	27,63	18,40	18,4	16,16	16,16	2,16	2,16	1,39	1,39	4,59	4,59	0,50	0,50	6,13	6,13
ИТОГО	100,00	100,00	16,29	16,29	5,31	5,31	1,44	1,44	27,63	27,63	18,40	18,4	16,16	16,16	2,16	2,16	1,39	1,39	4,59	4,59	0,50	0,50	6,13	6,13
ПОЛУЧЕНО																								
Черная медь	2,96	2,96	80,00	2,37	4,00	0,12	4,00	0,12	5,00	0,15	1,00	0,03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,00	0,18
Штейн	33,58	33,58	40,0	13,43	1,60	0,53	0,4	0,14	30,7	10,31	24,00	8,06	—	—	—	—	—	—	3,00	1,01	—	—	0,3	0,09
Грубая пыль	1,50	1,50	16,30	0,24	5,30	0,08	1,4	0,02	27,6	0,41	18,40	0,28	16,20	0,24	2,20	0,03	1,40	0,02	4,60	0,07	0,50	0,01	6,10	0,09
Газ	13,94	13,94	—	—	—	—	—	—	—	—	71,70	10,00	—	—	—	—	—	—	—	—	28,30	3,94	—	—
Тонкие пыли	3,63	3,63	—	—	84,0	3,05	16,0	0,58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Шлак	44,37	44,37	0,54	0,25	3,44	1,53	1,31	0,58	37,75	16,76	0,07	0,03	35,9	15,92	4,80	2,13	3,09	1,37	7,90	3,51	—	—	5,23	2,29
ИТОГО	99,98	99,98	—	16,29	—	5,31	—	1,44	—	27,63	—	18,4	—	16,16	—	2,16	—	1,39	—	4,59	—	3,95	—	2,65
Невязка баланса	—0,02	—0,02	—	0	—	0	—	0	—	0	—	0	—	0	—	0	—	0	—	0	—	3,45	—	—3,47

Масса  $\text{SiO}_2$  в исходном шлаке — 15,92 кг (см. табл. 4.17). Содержание  $\text{SiO}_2$  в скорректированном шлаке

$$15,92 \cdot 100 / 46,17 = 34,48 \%$$

Оксиды железа представляем в виде общей формулы  $\text{FeO}$ . Масса  $\text{FeO}$  в шлаке:

$$55,8 \text{ г/моль Fe входит в состав } (55,8 + 16) = 71,8 \text{ г/моль FeO}$$

$$16,75 \text{ кг Fe входит в состав } x \text{ кг FeO}$$

$$16,75 \cdot 71,8 / 55,8 = 21,55 \text{ кг.}$$

Содержание оксида железа в шлаке

$$21,55 \cdot 100 / 46,17 = 46,68 \%$$

Таким образом, получаем соотношение основных шлакообразующих в шлаке при плавке без добавки флюсов

$$\text{FeO} : \text{SiO}_2 : \text{CaO} = 46,68 : 34,48 : 2,97.$$

Сопоставляя расчетные данные состава шлака с оптимальным составом, видим, что в расчетном шлаке не хватает  $\text{CaO}$  при избытке  $\text{FeO}$ . Принимаем следующее соотношение основных шлакообразующих, которое должно быть получено после добавки флюсов:

$$\text{FeO} : \text{SiO}_2 : \text{CaO} = 40 : 34 : 10.$$

Для получения шлаков такого состава добавка флюсов необходима. Обозначим массу кварца  $x$ ; массу известняка  $y$ . Масса уже рассчитанного шлака с учетом добавочного кислорода составляет 46,17 кг.

Составы флюсов приведены в табл. 4.20. Флюсы содержат оксиды кремния и кальция, при плавке эти компоненты перейдут в шлак;  $\text{CO}_2$ , входящий в состав известняка, перейдет в газовую фазу за счет протекания реакции



Таким образом, получить массу нового шлака в результате сложения масс исходного шлака, кварца и известняка нельзя. Для удобства расчета составим табл. 4.21.

Таблица 4.21

## Расчет массы флюсов

Материал	Масса, кг	Массы оксидов, кг		
		FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO
Шлак без флюсов	46,17	21,55	15,92	1,37
Кварц	$x$	—	$92x/100$	—
Известняк	$y$	—	$3,57y/100$	$54y/100$

Составим систему уравнений по выбранному соотношению:

$$\text{FeO} : \text{SiO}_2 : \text{CaO} = 40 : 34 : 10$$

$$\begin{cases} \text{FeO/SiO}_2 & 40/34 = 21,55/(15,92 + 0,92x + 0,0357y); \\ \text{FeO/CaO} & 40/10 = 21,55/(1,37 + 0,54y). \end{cases}$$

Решив систему уравнений, получаем, что необходимо добавить 3,5 кг кварца и 7,44 кг известняка. При добавке такого количества известняка, в газ перейдет CO<sub>2</sub>

$$7,44 \cdot 42,43/100 = 3,16 \text{ кг},$$

где 42,43 — содержание CO<sub>2</sub> в известняке, % (см. табл. 4.20).

С учетом этого в шлак перейдет от общей массы известняка

$$7,44 - 3,16 = 4,28 \text{ кг}.$$

Получаем новую массу и новый состав шлака с флюсами (табл. 4.22).

Таблица 4.22

## Состав и масса шлака при плавке с флюсами

Материал	Масса, кг	Масса элементов, кг									
		Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O <sub>2</sub>	Пр.
Шлак без флюсов	46,17	0,25	1,53	0,58	16,76	0,03	15,92	2,13	1,37	5,30	2,3
Кварц	3,50	—	—	—	—	—	3,22	0,07	—	—	0,21
Известняк	4,29	—	—	—	—	—	0,27	—	4,02	—	—
ИТОГО шлак с флюсами	53,96	0,25	1,53	0,58	16,76	0,03	19,41	2,20	5,39	5,30	2,51
Содержание, %	100,00	0,45	2,84	1,07	31,06	0,06	35,97	4,07	9,99	9,82	4,67

#### 4.1.6. Расчет количества дутья и состава газов

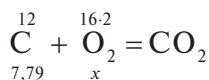
Расход кокса при совместной переработке первичного и вторичного сырья составляет 7–10 % от массы шихты. Примем по практическим данным расход кокса 8,5 % от массы медьсодержащего сырья, т. е. 8,5 кг на 100 кг сырьевой части шихты. Состав кокса представлен в табл. 4.23.

Таблица 4.23

Состав кокса

Компонент	Содержание, %	Масса, кг
C	91,60	7,79
S	1,18	0,10
Прочие	7,22	0,61
ИТОГО	100,00	8,50

На полное сжигание углерода кокса до  $\text{CO}_2$  потребуется кислорода



$$x = (7,79 \cdot 16 \cdot 2) / 12 = 20,77 \text{ кг},$$

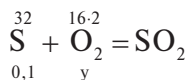
где 7,79 — масса углерода в коксе, кг (см. табл. 4.23);

16 и 12 — атомные массы кислорода и углерода соответственно, г/моль.

В результате протекания этой реакции образуется  $\text{CO}_2$

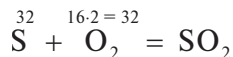
$$7,79 + 20,77 = 28,56 \text{ кг}.$$

Количество кислорода на окисление серы кокса рассчитываем так:



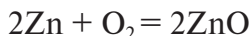
$$y = (0,1 \cdot 16 \cdot 2) / 32 = 0,10 \text{ кг}.$$

По расчету предварительного материального баланса, в газовую фазу переходит 10 кг серы шихты (см. табл. 4.19). Без учета окисления серы, за счет подсосов воздуха через загрузочные окна, на окисление 10 кг серы шихты на фурмах по реакции



потребуется 10 кг кислорода.

Цинк, переходящий в пыль, окисляется по реакции

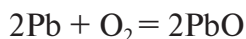


По расчету предварительного материального баланса, в тонкие пыли переходит 3,05 кг цинка (см. табл. 4.19), тогда масса кислорода на окисление цинка составит

$$3,05 \cdot 16/65,4 = 0,75 \text{ кг},$$

где 65,4 и 16 — атомные массы цинка и кислорода соответственно, г/моль.

Свинец, переходящий в пыль, также окисляется по реакции

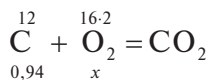


По расчету предварительного материального баланса, в тонкие пыли переходит 0,58 кг свинца (см. табл. 4.22), тогда масса кислорода на окисление свинца составит

$$0,58 \cdot 16/207,2 = 0,04 \text{ кг},$$

где 207,2 и 16 — атомные массы свинца и кислорода соответственно, г/моль.

В шихту входит клинкер, содержащий углерод (см. табл. 4.11). Как было определено при расчете газов, в газовую фазу переходит 0,94 кг углерода клинкера. Для сжигания 0,94 кг углерода клинкера до  $\text{CO}_2$  потребуется кислорода



$$0,94 \cdot 16 \cdot 2/12 = 2,51 \text{ кг}.$$

В штейне содержится 1,01 кг кислорода (см. табл. 4.14).

В шлаке содержится 5,30 кг кислорода (см. табл. 4.22).

Всего кислорода требуется

$$20,76 + 0,1 + 10,0 + 0,75 + 0,04 + 2,51 + 1,01 + 5,30 = 40,48 \text{ кг}.$$



С шихтой вносится 4,59 кг кислорода (см. табл. 4.11).

Таким образом, с учетом кислорода, вносимого шихтой, в печь теоретически необходимо подать кислорода

$$40,48 - 4,59 = 35,89 \text{ кг.}$$

При шахтной плавке необходимо окислить сульфиды в шахте печи и учесть потери дутья при прочистке фурм и потери за счет различных неплотностей в системе, поэтому подать кислорода в печь нужно больше теоретически рассчитанного. Однако в условиях совместной плавки первичного и вторичного сырья нужно создать слабовосстановительную атмосферу в верхней части печи для отгонки цинка, поэтому принимаем избыток подаваемого кислорода минимальный — 20 % против теоретически подсчитанного. Масса кислорода с учетом избытка составит

$$35,89 \cdot 1,2 = 43,07 \text{ кг.}$$

В качестве дутья используем воздух. Массовая доля кислорода в воздухе 23 % (объемная доля 21 %), массовая доля азота — 77 % (объемная доля 79 %), прочими газами пренебрегаем. В этом случае через фурмы следует подать воздуха

$$43,07 \cdot 100/23 = 187,26 \text{ кг,}$$

в т. ч. азота

$$187,26 - 43,07 = 144,19 \text{ кг.}$$

Объем подаваемого воздуха при 20 °С и 101,3 кПа составит

$$V = m/p = 187,26/1,21 = 154,76 \text{ м}^3,$$

где 1,21 — плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

В результате подачи флюсов и дутья изменится состав и количество отходящих газов и тонкой пыли. Составы этих продуктов плавки без флюсов и дутья приведены в табл. 4.16. Теперь к этому количеству добавится кислород на окисление; сера от горения топлива; СО<sub>2</sub> от горения углерода топлива и от диссоциации СаСО<sub>3</sub> известняка (табл. 4.24). В газы перейдет также весь азот дутья и неизрасходованный кислород.

Таблица 4.24

**Масса CO<sub>2</sub> в газах**

Статья прихода	Химическая реакция	Масса CO <sub>2</sub> , кг
Горение топлива (кокс)	$C + O_2 = CO_2$	28,56
Горение С клинкера	$C + O_2 = CO_2$	3,45
Диссоциация CaCO <sub>3</sub> шихты	$CaCO_3 = CaO + CO_2$	0,49
Диссоциация CaCO <sub>3</sub> известняка флюса	$CaCO_3 = CaO + CO_2$	3,16
ВСЕГО		35,66

Масса серы в газах составит

$$10 + 0,10 = 10,10 \text{ кг,}$$

где 10 — масса серы, перешедшей в газ из шихты, кг;

0,10 — масса серы, перешедшей в газ из топлива, кг.

Получаем новую массу и состав тонких пылей и газов (табл. 4.25—4.26).

Таблица 4.25

**Состав тонких пылей**

Показатель	Компонент			ИТОГО
	Zn	Pb	O <sub>2</sub>	
Масса, кг	3,05	0,58	0,79	4,42
Содержание, %	69,00	13,12	17,88	100,00

Таблица 4.26

**Состав отходящих газов**

Показатель	Компонент					ИТОГО
	CO <sub>2</sub>	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Прочие	
Масса, кг	35,66	10,1	19,78	144,19	0,61	210,34
Содержание, мас. %	16,95	4,80	9,40	68,55	0,29	100,00

Все полученные данные сводим в итоговую таблицу материального баланса (табл. 4.27).

Таблица 4.27

Материальный баланс шахтной плавки

Материал	Масса, кг	Выход %	Cu		Zn		Pb		Fe		S		SiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		CaO		O <sub>2</sub>		CO <sub>2</sub>		Проч.	
			%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
ЗАГРУЖЕНО																								
Шихта	100,00	32,60	16,29	16,29	5,31	5,31	1,44	1,44	27,63	27,63	18,40	18,40	16,16	16,16	2,16	2,16	1,39	1,39	4,59	4,59	0,50	0,50	6,13	6,13
Кварц	3,50	1,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	92,00	3,22	2,00	0,07	—	—	—	—	—	—	6,00	0,21
Известняк	7,44	2,43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,6	0,27	—	—	54,00	4,02	—	—	42,4	3,16	—	—
Топливо	8,50	2,77	—	—	—	—	—	—	—	—	1,20	0,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	98,00	8,40
Дутье	187,27	61,06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21,00	43,07	—	—	79,00	144,2
ИТОГО	306,71	100,00	—	16,29	—	5,31	—	1,44	—	27,63	—	18,5	—	19,64	—	2,23	—	5,41	—	47,66	—	3,66	—	158,9
ПОЛУЧЕНО																								
Черная медь	2,96	0,97	80,00	2,37	4,00	0,12	4,00	0,12	5,00	0,15	1,00	0,03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,00	0,18
Штейн	33,58	10,95	40,00	13,43	1,6	0,53	0,4	0,14	30,7	10,31	24,00	8,06	—	—	—	—	—	—	3,00	1,01	—	—	0,30	0,09
Грубая пыль	1,50	0,49	16,3	0,24	5,3	0,08	1,4	0,02	27,6	0,41	18,40	0,28	16,2	0,24	2,20	0,03	1,40	0,02	4,60	0,07	0,5	0,01	6,10	0,09
Газ	210,34	68,58	—	—	—	—	—	—	—	—	4,80	10,1	—	—	—	—	—	—	9,40	19,78	16,95	35,66	68,55	144,8
Тонкие пыли	4,42	1,44	—	—	69,0	3,05	13,1	0,58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17,88	0,79	—	—	—	—
Шлак	53,96	17,59	0,45	0,25	2,84	1,53	1,07	0,58	31,06	16,75	0,06	0,03	35,97	19,40	4,07	2,20	9,99	5,39	9,82	5,30	0,00	0,00	4,67	2,51
ИТОГО	306,76	100,00	—	16,29	—	5,31	—	1,44	—	27,63	—	18,50	—	19,64	—	2,23	—	5,41	—	26,9	—	35,67	—	147,7

## 4.2. Расчет теплового баланса совместной плавки первичного и вторичного сырья

Расчет теплового баланса ведем на основе материального баланса по методике, рассмотренной в гл. 3. Массы и состав материалов, подаваемых в печь, а также продуктов процесса находим по табл. 4.27 и 4.11.

### 4.2.1. Приход тепла

Количество тепла, вносимого подаваемыми в печь шихтовыми материалами, кДж, рассчитываем по формуле

$$Q = mc_p \cdot t,$$

где  $m$  — масса материала, кг;

$c_p$  — удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·град);

$t$  — температура материала, °С.

Принимаем, что шихта и флюсы поступают в печь с температурой 20 °С.

Теплоемкость шихты рассчитали по методике, описанной в подгл. 3.4 через удельные теплоемкости отдельных компонентов и их содержание в шихте (см. табл. 4.11) по формуле

$$C_{\text{общ}} = \sum c_i \cdot n_i.$$

Теплоемкость шихты — 0,89 кДж/(кг·град).

Тепло, вносимое шихтой, составит

$$Q_{\text{шихта}} = 100 \cdot 0,89 \cdot 20 = 1\,780 \text{ кДж.}$$

Определяем теплоемкость кварца

$$(92 \cdot 1,134 + 2 \cdot 1,26 + 6 \cdot 1) \cdot 0,01 = 1,128 \text{ кДж/(кг·град),}$$

где 92; 2; 6 — содержание  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и прочих в кварце, %, (см. табл. 4.20); 1,134; 1,26; 1 — удельные теплоемкости  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и прочих соответственно, кДж/(кг·град) (см. табл. 3.5).

Тепло, вносимое кварцем, составит

$$Q_{\text{кварц}} = 3,5 \cdot 1,128 \cdot 20 = 78,96 \text{ кДж.}$$

Определяем теплоемкость известняка

$$(3,57 \cdot 1,134 + 96,43 \cdot 1,042) \cdot 0,01 = 1,045 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град}),$$

где 96,43 — содержание  $\text{CaCO}_3$  в известняке ( $\text{CaO} + \text{CO}_2$ ), %, (см. табл. 4.20).

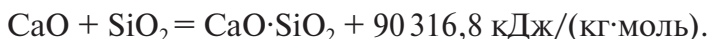
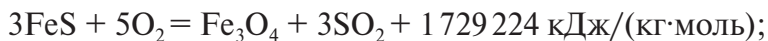
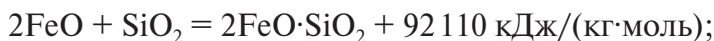
Тепло, вносимое известняком, составит

$$Q_{\text{изв}} = 7,44 \cdot 1,045 \cdot 20 = 155,49 \text{ кДж}.$$

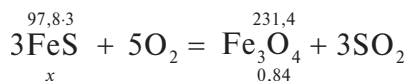
В качестве дутья в печь подаем воздух. Объем подаваемого в печь воздуха определи при расчете дутья —  $154,77 \text{ м}^3$ . Для снижения расхода топлива, воздух подогреваем до  $100^\circ \text{С}$ . Теплоемкость воздуха при такой температуре составит  $1,306 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$  (см. табл. 3.8). Тепло, вносимое воздухом, составит

$$Q_{\text{дутья}} = 154,77 \cdot 1,306 \cdot 100 = 20\,212,96 \text{ кДж}.$$

Рассчитываем тепло основных экзотермических реакций по методике, рассмотренной в подгл. 3.2. При шахтной плавке основное количество тепла выделяется за счет реакций шлакообразования



При расчете количества флюсов и дутья определили, что 95 % железа в шлаке содержится в виде фаялита  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ , остальные 5 % железа — в виде магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Масса железа в магнетите — 0,84 кг. Для получения такого количества магнетита необходимо окислить FeS



$$x = 0,84 \cdot 87,8 \cdot 3/231,4 = 0,95 \text{ кг},$$

где 97,8 и 231,4 — атомные массы FeS и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  соответственно, г/моль.

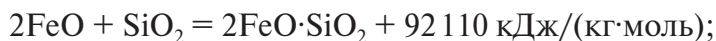
Тепловой эффект реакции составит

$$Q_{\text{FeS}} = mQ_n/M = 0,95 \cdot 1\,729\,224/(87,8 \cdot 3) = 6\,236,76 \text{ кДж}.$$

Масса железа в фаялите — 15,91 кг и с ним связано кислорода 4,56 кг. Общая масса FeO составит

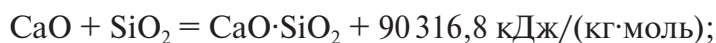
$$15,91 + 4,56 = 20,47 \text{ кг.}$$

Тепловой эффект реакции будет



$$Q_{\text{FeO}} = 20,47 \cdot 92\,110 / (71,8 \cdot 2) = 13\,130,17 \text{ кДж.}$$

Масса CaO в шлаке — 4,02 кг (см. табл. 4.27). Тепловой эффект реакции



$$Q_{\text{CaO}} = 4,02 \cdot 90\,316,8 / 56 = 6\,483,46 \text{ кДж.}$$

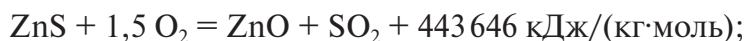
Реакция окисления серы



В газовую фазу переходит 10,1 кг серы. Тепловой эффект реакции составит

$$Q_{\text{S}} = 10,1 \cdot 298\,032 / 32 = 94\,066,35 \text{ кДж.}$$

В шихте содержится 1,61 кг ZnS (см. табл. 4.11), в пыль переходит 1,5 % от этого количества, в реакции вступает 98,5 %, в штейн и черную медь переходит 0,77 кг (см. табл. 4.14). Тепло от окисления оставшегося сульфида цинка по реакции



$$Q_{\text{ZnS}} = (1,61 \cdot 0,985 - 0,77) \cdot 443\,646 / 97,4 = 3\,716,1 \text{ кДж.}$$

Итого тепло, выделившееся при протекании экзотермических реакций

$$Q_{\text{экз}} = 6\,236,76 + 9\,380,99 + 94\,066,35 + 6\,483,46 + 13\,130,17 = 123\,632,84 \text{ кДж.}$$

Тепло от сгорания топлива определим по реакции горения углерода



Масса углерода в коксе — 7,79 кг (см. табл. 4.23), количество тепла от сгорания такого количества углерода составит

$$Q_{\text{кокс}} = 7,79 \cdot 395\,018,4 / 12 = 256\,432,78 \text{ кДж.}$$

## 4.2.2. Расход тепла

Выходящие из печи продукты имеют сложный состав. Для расчета уносимого ими тепла определим удельные теплоемкости каждого продукта плавки. Теплоемкость грубой пыли соответствует теплоемкости шихты и составляет 0,89 кДж/(кг·град); теплоемкость шлака полученного состава определяем по табл. 3.7. Теплоемкости остальных твердых продуктов рассчитаем по методике, рассмотренной в подгл. 3.4 (см. табл. 3.6), с помощью составленной табл. 4.28.

Пыли и газы покидают печь с температурой 300 °С, жидкие продукты — с температурой 1200 °С.

Таблица 4.28

Теплоемкость продуктов плавки

Компонент	Содержание, %	$c_p$ , кДж/(кг·град)	Теплоемкость компонента в материале, кДж/(кг·град)
Черная медь			
Cu	80,0	0,49	$80 \cdot 0,49/100 = 0,392$
Fe	5,0	0,82	$5 \cdot 0,82/100 = 0,041$
Pb	4,0	0,14	0,006
Zn	4,0	0,4	0,016
S	1,0	0,7	0,007
Прочие	6,0	0,3	0,018
ИТОГО теплоемкость черной меди			0,480
Штейн			
$Cu_2S$	50,08	0,475	0,238
FeS	35,91	0,570	0,205
$Fe_3O_4$	10,92	0,609	0,067
PbS	0,48	0,214	0,001
ZnS	2,34	0,517	0,012
Прочие	0,27	0,5	0,001
ИТОГО теплоемкость штейна			0,524
Тонкие пыли			
ZnO	87,17	0,84	0,732
PbO	12,83	0,14	0,018
ИТОГО теплоемкость тонкой пыли			0,750
Шихта и флюсы			
Шихта	90,14	0,89	0,802
Кварц	3,15	1,13	0,036
Известняк	6,71	1,04	0,070
Общая теплоемкость шихты и флюсов			0,908

Тепло, затраченное на нагрев и расплавление шихты и флюсов, составит

$$Q_{\text{наг и распл}} = (100 + 3,5 + 7,44) \cdot 0,908 \cdot (1200 - 20) = 118\,865,55 \text{ кДж},$$

где 100; 3,5; 7,44 — массы шихты, кварца и известняка соответственно (см. табл. 4.27), кг;

0,908 — общая теплоемкость шихты и флюсов (см. табл. 4.29), кДж/(кг·град);

1200 — средняя температура начала плавления шихты, °С;

20 — температура шихты при загрузке в печь, °С.

Тепло, уносимое черной медью,

$$Q_{\text{черн медь}} = 2,96 \cdot 0,480 \cdot 1200 = 1\,704,96 \text{ кДж}.$$

Тепло, уносимое штейном,

$$Q_{\text{штейн}} = 33,58 \cdot 0,523 \cdot 1200 = 21\,074,81 \text{ кДж}.$$

Тепло, уносимое шлаком,

$$Q_{\text{шлак}} = 53,95 \cdot 1,36 \cdot 1200 = 88\,062,72 \text{ кДж}.$$

Тепло, уносимое грубой пылью,

$$Q_{\text{гр пыль}} = 1,50 \cdot 0,89 \cdot 300 = 400,45 \text{ кДж}.$$

Тепло, уносимое тонкой пылью,

$$Q_{\text{т пыль}} = 4,42 \cdot 0,750 \cdot 300 = 994,5 \text{ кДж}.$$

Пересчитаем массу отходящего газа в объем, а содержание компонентов переведем из массовых в объемные проценты по методике, рассмотренной в подгл. 3.5 (см. табл. 3.9). Состав газа приведен в табл. 4.27. Серу в газе представим в виде  $\text{SO}_2$  — при массовой доле серы в газе 4,8 % (см. табл. 4.17), массовая доля  $\text{SO}_2$  составит 9,6 %. Следовательно, снизится содержание в газе свободного кислорода

$$9,4 - 4,8 = 4,6 \, \%.$$

Прочими составляющими, массовая доля которых в газе 0,3 %, пренебрегаем. Получаем состав газа, приведенный в табл. 4.29.

Таким образом, газ массой 100 кг занимает объем  $70,05 \text{ м}^3$ . Масса газа составляет 210,34 кг (см. табл. 4.27), объем газа составит

$$210,34 \cdot 70,05 / 100 = 147,4 \text{ м}^3.$$



Таблица 4.29

## Состав отходящего газа

Соединение	Содержание, мас. %	Молекулярная масса, г/моль	Объем, м <sup>3</sup>	Содержание, об. %
CO <sub>2</sub>	16,95	44	$16,95 \cdot 22,4/44 = 8,63$	$8,63 \cdot 100/70,05 = 12,32$
SO <sub>2</sub>	9,6	64	$9,6 \cdot 22,4/64 = 3,36$	$3,36 \cdot 100/70,05 = 4,80$
O <sub>2</sub>	4,60	32	$4,60 \cdot 22,4/32 = 3,22$	$3,22 \cdot 100/70,05 = 4,60$
N <sub>2</sub>	68,55	28	$68,55 \cdot 22,4/28 = 54,84$	$54,84 \cdot 100/70,05 = 78,28$
Прочие	0,30	—	—	—
ИТОГО	100,00	—	70,05	100,00

Теплоемкость газа (табл. 4.30) определим аналогично расчету теплоемкости твердых продуктов плавки, теплоемкости отдельных соединений найдем по табл. 3.8.

Таблица 4.30

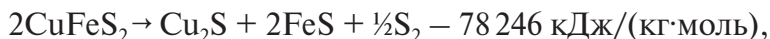
## Теплоемкость отходящих газов

Компонент	Содержание, об. %	$c_p$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	Теплоемкость компонента в газе, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)
CO <sub>2</sub>	12,32	1,873	0,231
SO <sub>2</sub>	4,80	1,9614	0,094
O <sub>2</sub>	4,60	1,003	0,046
N <sub>2</sub>	78,29	1,3104	1,026
ИТОГО теплоемкость отходящих газов			1,397

Тепло, уносимое газами,

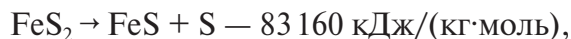
$$Q_{\text{газ}} = 147,4 \cdot 1,397 \cdot 300 = 61\,775,34 \text{ кДж.}$$

Тепло, затраченное на основные эндотермические реакции — диссоциацию халькопирита, пирита и известняка, рассчитаем с учетом того, что в пыли перейдет 1,5 % каждого материала, а в реакции вступит 98,5 %.



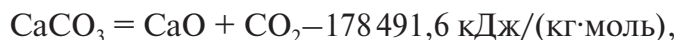
$$Q_{\text{CuFeS}_2} = 6,74 \cdot 0,985 \cdot 78\,246 / (183,3 \cdot 2) = 14\,16,99 \text{ кДж,}$$

где 6,74 — масса CuFeS<sub>2</sub> в шихте (см. табл. 4.11), кг.



$$Q_{\text{FeS}_2} = 21,44 \cdot 0,985 \cdot 83\,160/119,8 = 14\,659,48 \text{ кДж},$$

где 21,44 — масса  $\text{FeS}_2$  в шихте (см. табл. 4.11), кг.



$$Q_{\text{CaCO}_3} = 8,32 \cdot 0,985 \cdot 178\,491,6/100 = 14\,627,74 \text{ кДж},$$

где 8,32 — общая масса  $\text{CaCO}_3$  в шихте и флюсе, кг.

Итак, будет затрачено на эндотермические реакции тепла

$$Q_{\text{энд}} = 14\,627,74 + 1\,416,99 + 14\,659,48 = 30\,704,21 \text{ кДж}.$$

Рассмотрим расход тепла на нагрев воды в кессонах.

Используем систему испарительного охлаждения. По практическим данным работы шахтных печей, для испарительного охлаждения на 1 кг шихты требуется в среднем 0,15 кг воды. На общую массу шихты и флюсов потребуется воды

$$0,15 \cdot (100 + 3,5 + 7,44) = 16,64 \text{ кг}.$$

Поступающая в кессоны вода имеет температуру 30 °С. При организации испарительного охлаждения необходимо нагреть воду с 30 до 100 °С; испарить воду; полученный пар перегреть до 160–180 °С.

Затраты тепла на нагрев воды с 30 до 100 °С составят

$$Q_{\text{нагрев воды}} = 16,64 \cdot 4,19 \cdot (100 - 30) = 4\,880,51 \text{ кДж},$$

где 4,19 — теплоемкость воды, кДж/(кг·град).

Затраты тепла на испарение воды составят

$$Q_{\text{испар воды}} = 16,64 \cdot 2\,260 = 37\,606,4 \text{ кДж},$$

где 2260 — удельная теплота парообразования воды, кДж/кг.

Затраты тепла на перегрев пара со 100 до 170 °С составят

$$Q_{\text{перег пара}} = 16,64 \cdot 1,977 \cdot (170 - 100) = 2\,302,81,4 \text{ кДж},$$

где 1,977 — теплоемкость водяного пара при 170 °С, кДж/(кг·град).

Итак, затраты тепла на водяное охлаждение составят

$$Q_{\text{вод охл}} = 4\,880,51 + 37\,606,4 + 2\,302,81 = 44\,789,72 \text{ кДж}.$$

Все полученные данные сводим в таблицу теплового баланса (табл. 4.31) и определяем долю каждой статьи баланса в общем приходе и расходе тепла.

Потери тепла на лучеиспускание, потери тепла через загрузочные окна и другие неучтенные потери находим как разность между приходной и расходной частью теплового баланса. В общем балансе эти потери должны составлять не более 10 – 12 %. В результате расчета получили, что неучтенные потери составили 9,7 % в общем количестве затрат тепла, что соответствует условию.

Таблица 4.31

**Тепловой баланс шахтной плавки**

Приход тепла			Расход тепла		
Статья баланса	кДж	%	Статья баланса	кДж	%
Шихта	1 780,00	0,44	Черная медь	1 704,96	0,42
Кварц	78,96	0,02	Штейн	21 074,81	5,17
Известняк	155,49	0,04	Грубая пыль	400,5	0,09
Дутье	20 212,96	4,95	Газ	61 775,34	15,14
Экзотермические реакции	129 297,73	31,69	Тонкие пыли	994,50	0,24
Горение топлива	256 432,78	62,86	Шлак	88 062,72	21,59
ИТОГО	407 957,92	100,00	Нагрев и расплавление шихты	118 865,55	29,14
			Эндотермические реакции	30 704,21	7,53
			Водяное охлаждение	44 789,72	10,98
			Неучтенные потери	39 585,61	9,70
			ИТОГО	407 957,92	100,00

### Контрольные вопросы

1. В какой атмосфере ведут процесс шахтной плавки сульфидного и вторичного сырья?
2. Какой горючий материал используется в качестве топлива для шахтных печей?
3. С какой целью мелкодисперсные материалы перед плавкой брикетируют?
4. Назовите коэффициент использования тепла шахтной печи.
5. Дайте определение понятию «черная медь».

---

## 5. Плавка в агрегате с погружной фурмой — процесс Ausmelt

---

**Л**идирующую позицию в цветной металлургии для переработки сульфидных медных концентратов занимают автогенные пирометаллургические процессы — плавка в печи с погружной вертикальной фурмой (*англ.* TSL — Top submerged lance); плавка Ванюкова, плавка во взвешенном состоянии, процесс «Мицубиси», плавка в реакторах типа Норанда и т. д. Это связано с серьезными технологическими преимуществами автогенных процессов: низким расходом топлива за счет эффективного использования тепла экзотермических реакций; возможностью регулировать десульфуризацию в широких пределах и, следовательно, получать богатые штейны; а также с высокой производительностью и автоматизацией процессов.

Процесс Ausmelt — разновидность плавки в печах с погружной фурмой. Конструктивно печи данного типа представляют собой вертикально ориентированные агрегаты диаметром 3–6 м, выполненные из стали с футеровкой огнеупорным кирпичом (рисунок на с. 91).

Охлаждение стен и свода печи обеспечивается кессонами, через которые циркулирует очищенная техническая вода. Высота расплава в ванне составляет 1,5–2 м при общей высоте печи 8–12 м. Главной технологической особенностью печей является многоцелевая фурма, представляющая собой конструкцию типа «труба в трубе» и обеспечивающая возможность подачи в печь кислородно-воздушной смеси (КВС) или КВС и топлива. В качестве топлива могут быть использованы природный газ, мазут либо мелкодисперсный уголь. Фурма выполнена из нержавеющей стали, количество труб варьируется в пределах 2–4 в зависимости от условий плавки. Внешний диаметр фурмы составляет 0,3–0,5 м. Для охлаждения фурмы, по внешней трубе (кожуху фурмы) подают воздух, что приводит к образованию на поверхности фурмы слоя защитного гарнисажа. Кожух постоянно находится

над поверхностью шлаковой ванны на высоте примерно 1 м и обеспечивает защиту внутренних труб фурмы. Заглубление фурмы в расплав составляет 30–40 см при общей длине фурмы около 15 м. Защиту погруженной части фурмы также обеспечивает образующийся слой шлакового гарнисажа, основу которого составляет магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

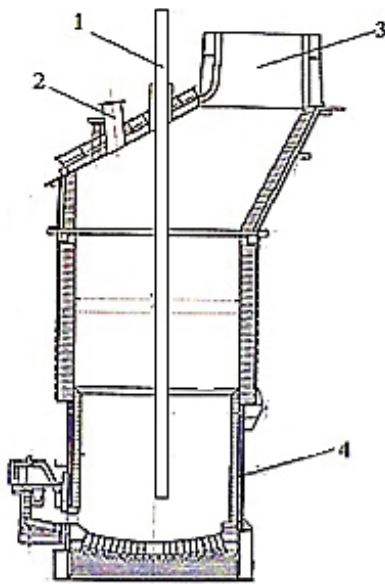


Схема печи Ausmelt:

1 — загрузочная воронка для подачи шихты; 2 — погружная фурма; 3 — аптейк;  
4 — водоохлаждаемые кессоны

В качестве дутья используют кислородно-воздушную смесь (КВС), что уменьшает объем отходящих газов и увеличивает концентрацию в газах  $\text{SO}_2$ . За счет подачи дутья непосредственно в расплав, удается достигнуть высокой (95–97 %) степени усвоения кислорода расплавом.

Плавка в печи TSL является типичным автогенным барботажным процессом, в котором окисление сульфидов железа происходит в шлакоштейновой эмульсии. В основном процессы окисления осуществляют с получением кислых шлаков с содержанием  $\text{SiO}_2$  на уровне 30–35 %, соотношение плотностей шлака и штейна составляет приблизительно 1:1,6.

Основной параметр для контроля состава шлака — соотношение  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$ , которое должно составлять 1,4. Для достижения необходимого соотношения, при плавке добавляют кварцевый флюс. Содержание

СаО в шлаке должно быть на уровне 4–6 %, т. к. СаО увеличивает жидкотекучесть шлака при низких температурах и таким образом потенциально содействует механизмам массопереноса кислорода в печи. Для получения нужного содержания СаО в шлаке, в шихту добавляют известковый флюс. Содержание магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в шлаке увеличивается с ростом содержания меди в штейне и соотношения  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  в шлаке. В связи с тем, что магнетит существенно влияет на вязкость шлака, его содержание в шлаке не должно превышать 5–10 %.

Состав штейна и температуру расплава регулируют за счет изменения содержания кислорода в КВС и количества подаваемого через фурму топлива. Увеличение количества подаваемого кислорода приводит к повышению содержания меди в штейне — до 75 %, в зависимости от содержания меди в сырье.

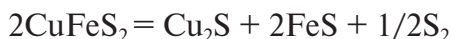
Уровень расплава в процессе поддерживают на постоянном уровне, поэтому шлак и штейн непрерывно выпускают из печи через сифон по желобу во внешний отстойник (стандартная схема) либо во вторую плавильную печь (схема непрерывного конвертирования).

Малый объем жидкой ванны печи не позволяет производить отстаивание шлака от штейна непосредственно в печи без остановки процесса продувки, поэтому необходимо использовать внешний агрегат для разделения шлака и штейна. В качестве такого агрегата используют трехэлектродные электропечи, печи-миксеры и т. д. Поскольку в этих агрегатах происходит только отстаивание шлакоштейновой эмульсии, их необходимо отапливать. Штейн из внешнего горна выпускают по мере потребности конвертерного передела.

На ЗАО «Карабашмедь» (г. Карабаш Челябинской области), единственном на сегодняшний день предприятии в России, использующем печь Ausmelt, в качестве отстойника применяют миксер емкостью по расплаву 300 т, который отапливается природным газом.

При плавке медных концентратов в печи Ausmelt не требуется их сушка, брикетирование или обжиг. Шихта постоянно загружается в печь через загрузочное отверстие в своде печи.

Основные сульфидные минералы медных концентратов — халькопирит  $\text{CuFeS}_2$  и пирит  $\text{FeS}_2$  — при плавке разлагаются по реакциям

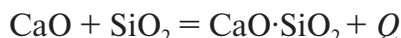
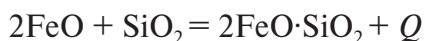


Выделившаяся в результате этих реакций сера сгорает непосредственно в ванне расплава, а не в шахте печи, по реакции



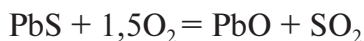
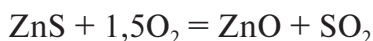
что обеспечивает очень высокую степень использования кислорода дутья (на уровне 94–97 %).

В расплаве происходят реакции шлакообразования, идущие с выделением тепла,



Реакции шлакообразования и окисления серы дают основное количество тепла при плавке.

Интенсивный барботаж расплава и низкий уровень пылеобразования (менее 1 %) в печи Ausmelt приводит к тому, что летучие элементы шихты (мышьяк, висмут, сурьма, свинец, цинк и др.) переходят в газовую фазу и образуют пыле-газовую смесь, которая выносится из печи и улавливается в системе пыле-газоочистки. Окисление летучих компонентов происходит над ванной расплава по реакциям



Таким образом, процесс Ausmelt позволяет перерабатывать шихту сложного состава с отгонкой летучих компонентов. Отсутствие подсосов воздуха позволяет получить газы с высоким содержанием  $\text{SO}_2$ , которые после очистки от пыли отправляют на сернокислотное производство. Шлаки перерабатывают на обогатительной фабрике с получением шлакового концентрата, который возвращается на плавку, или подвергают электропечному обеднению.

Основные технологические показатели процесса Ausmelt приведены в табл. 2.2.

## 5.1. Расчет материального баланса плавки медного сырья в печи Ausmelt

### 5.1.1. Расчет состава шихты

В состав шихты входят:

- медные сульфидные концентраты различных обогатительных фабрик;
- шлаковый концентрат, полученный при флотационной переработке плавильных шлаков печи Ausmelt и шлаков конвертеров;
- оборотные пыли циклонов;
- сульфидная руда с высоким содержанием пирита.

Химический и фазовый составы медьсодержащих компонентов шихты приведены в табл. 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1

Химический состав компонентов шихты

Материал	Содержание, %							
	Cu	Fe	Zn	Pb	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	Пр.
Концентрат медный 1	18,70	30,03	2,90	0,50	37,00	3,13	0,47	7,27
Концентрат медный 2	21,60	28,92	1,46	0,25	35,12	8,56	0,99	3,11
Концентрат шлаковый	20,81	27,10	0,73	0,47	12,30	15,85	1,92	20,82
Руда сульфидная	1,00	30,50	2,81	1,60	36,82	5,23	2,60	19,44
Пыль	17,15	16,44	0,06	0,02	5,40	8,46	1,20	51,27

Таблица 5.2

Основные соединения компонентов шихты

Материал	Основные соединения	Распределение меди, %
Концентрат медный 1	CuFeS <sub>2</sub> ; CuS; ZnS; PbS; FeS <sub>2</sub> ; SiO <sub>2</sub> ; CaCO <sub>3</sub>	CuFeS <sub>2</sub> — 90; CuS — 10
Концентрат медный 2	CuFeS <sub>2</sub> ; Cu <sub>2</sub> S; ZnS; PbS; FeS <sub>2</sub> ; SiO <sub>2</sub> ; CaCO <sub>3</sub>	CuFeS <sub>2</sub> — 80; Cu <sub>2</sub> S — 20
Концентрат шлаковый	Cu <sub>2</sub> S; Cu <sub>2</sub> O; ZnS; 2ZnO·SiO <sub>2</sub> ; PbO; 2FeO·SiO <sub>2</sub> ; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ; FeS; SiO <sub>2</sub> ; CaO	Cu <sub>2</sub> S — 80; Cu <sub>2</sub> O — 20
Руда сульфидная	CuFeS <sub>2</sub> ; ZnS; PbS; FeS <sub>2</sub> ; SiO <sub>2</sub> ; CaCO <sub>3</sub>	CuFeS <sub>2</sub> — 100
Пыль	Cu <sub>2</sub> S; Cu <sub>2</sub> O; ZnS; ZnO; PbO; FeO; SiO <sub>2</sub> ; CaO	Cu <sub>2</sub> S — 50; Cu <sub>2</sub> O — 50



На первом этапе рассчитываем рациональный состав каждого компонента шихты по методике, рассмотренной в гл. 1 «Расчет шихты». Расчеты рационального состава каждого компонента выполняем на 100 кг сухого материала по данным химического и фазового анализов (см. табл. 5.1 и 5.2). Результаты расчета заносим в табл. 5.3–5.7.

Таблица 5.3

**Рациональный состав медного концентрата 1**

Соединения	Элементы, %								ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	Пр.	
CuFeS <sub>2</sub>	16,83	—	—	14,79	17,02	—	—	—	48,64
CuS	1,87	—	—	—	0,95	—	—	—	2,82
ZnS	—	2,90	—	—	1,42	—	—	—	4,32
PbS	—	—	0,50	—	0,08	—	—	—	0,58
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	15,24	17,54	—	—	—	32,78
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	3,13	—	—	3,13
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	0,47	0,37	0,84
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	6,89	6,89
ИТОГО	18,70	2,90	0,50	30,03	37,01	3,13	0,47	7,26	100,00

Таблица 5.4

**Рациональный состав медного концентрата 2**

Соединения	Элементы, %								ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	Пр.	
CuFeS <sub>2</sub>	17,28	—	—	15,18	17,47	—	—	—	49,93
Cu <sub>2</sub> S	4,32	—	—	—	1,09	—	—	—	5,41
ZnS	—	1,46	—	—	0,71	—	—	—	2,17
PbS	—	—	0,25	—	0,04	—	—	—	0,29
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	13,74	15,81	—	—	—	29,55
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	8,56	—	—	8,56
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	0,99	0,77	1,76
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	2,33	2,33
ИТОГО	21,60	1,46	0,25	28,92	35,12	8,56	0,99	3,10	100,00

Таблица 5.5

**Рациональный состав концентрата шлакового**

Соединения	Элементы, %									ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	O	Пр.	
Cu <sub>2</sub> S	16,65	—	—	—	4,21	—	—	—	—	20,86
Cu <sub>2</sub> O	4,16	—	—	—	—	—	—	0,52	—	4,69
ZnS	—	0,58	—	—	0,29	—	—	—	—	0,87
2ZnO·SiO <sub>2</sub>	—	0,15	—	—	—	0,07	—	0,04	—	0,25
PbO	—	—	0,47	—	—	—	—	0,04	—	0,51
2FeO·SiO <sub>2</sub>	—	—	—	5,42	—	2,91	—	1,55	—	9,89
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	8,13	—	—	—	3,11	—	11,24
FeS	—	—	—	13,55	7,79	—	—	—	—	21,34
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	12,87	—	—	—	12,87
CaO	—	—	—	—	—	—	1,92	—	—	1,92
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	15,56	15,56
ИТОГО	20,81	0,73	0,47	27,10	12,29	15,85	1,92	5,26	15,56	100,00

Таблица 5.6

**Рациональный состав сульфидной руды**

Соединения	Элементы, %								ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	Пр.	
CuFeS <sub>2</sub>	1,00	—	—	0,88	1,01	—	—	—	2,89
ZnS	—	2,81	—	—	1,38	—	—	—	4,19
PbS	—	—	1,60	—	0,25	—	—	—	1,85
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	29,62	34,08	—	—	—	63,70
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	5,23	—	—	5,23
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	2,60	2,04	4,64
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	17,50	17,50
ИТОГО	1,00	2,81	1,60	30,50	36,72	5,23	2,60	19,54	100,00

Таблица 5.7

**Рациональный состав оборотной пыли**

Соединения	Элементы, %									ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	CO <sub>2</sub>	Пр.	
Cu <sub>2</sub> S	8,58	—	—	—	2,17	—	—	—	—	10,75
Cu <sub>2</sub> O	8,58	—	—	—	—	—	—	—	1,08	9,66
ZnS	—	0,06	—	—	0,03	—	—	—	—	0,09
PbO	—	—	0,02	—	—	—	—	—	0,002	0,022

Окончание табл. 5.7

Соединения	Элементы, %									ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	CO <sub>2</sub>	Пр.	
FeO	—	—	—	16,44	—	—	—	—	4,71	21,15
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	8,46	—	—	—	8,46
CaO	—	—	—	—	—	—	1,20	—	—	1,20
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	48,67	48,67
ИТОГО	17,16	0,06	0,02	16,44	2,20	8,46	1,20	0,00	54,46	100,00

На основании полученных результатов (см. табл. 5.3–5.7) выполнением расчет общего рационального состава медьсодержащей шихты. Соотношение медьсодержащих компонентов шихты приведено в табл. 5.8.

Таблица 5.8

## Состав шихты на плавку (без флюсов)

Вид сырья	Материал	Доля в шихте, %
Первичное сульфидное сырье	Концентрат медный 1	33,00
Первичное сульфидное сырье	Концентрат медный 2	55,00
Техногенное сырье	Концентрат шлаковый	8,00
Первичное сырье	Руда сульфидная	3,00
Оборотное сырье	Пыль	1,00
ИТОГО		100,00

Расчет ведем на 100 кг шихты по методике, рассмотренной в гл. 1 «Расчет шихты». Рациональный состав медьсодержащей шихты приведен в табл. 5.9.

Таблица 5.9

## Рациональный состав шихты, кг

Соединения	Элементы									ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	O <sub>2</sub>	Пр.	
CuFeS <sub>2</sub>	15,09	—	—	13,26	15,25	—	—	—	—	43,60
CuS	0,62	—	—	—	0,31	—	—	—	—	0,93
ZnS	—	1,89	—	—	0,93	—	—	—	—	2,82
PbS	—	—	0,35	—	0,05	—	—	—	—	0,40
FeS <sub>2</sub>	—	—	—	13,47	15,50	—	—	—	—	28,97
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	7,01	—	—	—	7,01
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	0,94	—	0,74	1,68
Cu <sub>2</sub> O	0,42	—	—	—	—	—	—	0,05	—	0,47

Окончание табл. 5.9

Соединения	Элементы									ВСЕГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	O <sub>2</sub>	Пр.	
2ZnO·SiO <sub>2</sub>	—	0,01	—	—	—	0,01	—	0,003	—	0,02
PbO	—	—	0,04	—	—	—	—	0,003	—	0,04
2FeO·SiO <sub>2</sub>	—	—	—	0,43	—	0,23	—	0,12	—	0,78
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	0,65	—	—	—	0,25	—	0,90
FeS	—	—	—	1,08	0,62	—	—	—	—	1,70
FeO	—	—	—	0,16	—	—	—	0,05	—	0,21
Cu <sub>2</sub> S	3,79	—	—	—	0,96	—	—	—	5,43	10,18
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	0,28	0,28
ИТОГО	19,92	1,90	0,39	29,05	33,62	7,25	0,94	0,476	6,45	100,00

Поскольку расчет вели на 100 кг шихты, строка «ИТОГО» даст нам химический состав шихты по основным компонентам. Для проверки полученного результата рассчитываем химический состав шихты по данным табл. 5.1 и 5.8 по методике, рассмотренной в гл. 1 «Расчет шихты». Массу каждого элемента в отдельных компонентах шихты рассчитываем по формуле

$$M = C_i \cdot D_i / 100,$$

где  $C_i$  — содержание элемента в компоненте шихты, кг (см. табл. 5.1);  
 $D_i$  — доля компонента в шихте, % (табл. 5.8).

Например, доля концентрата медного 1 в шихте — 33 % (см. табл. 5.8). Содержание меди в концентрате — 18,7 % (см. табл. 5.1). При расчете на 100 кг шихты, масса концентрата 1 в шихте составит 33 кг. С этим количеством концентрата в шихту придет меди

$$18,7 \cdot 33 / 100 = 6,17 \text{ кг.}$$

Массу остальных элементов рассчитываем аналогично приведенному расчету.

Полученные значения заносим в табл. 5.10. Расчет ведем на 100 кг сухой шихты, поэтому итоговая строка покажет не только массу отдельных элементов в шихте, но и химический состав шихты. Сравниваем итоговые данные табл. 5.9 и 5.10 — результаты расчетов совпали для всех элементов. Таким образом, расчет рационального состава шихты выполнен правильно, неучтенных химических соединений в шихте нет.

### 5.1.2. Расчет количества и состава штейна

В результате плавки получаем штейн — расплав сульфидов, основу которого составляют сульфид меди  $\text{Cu}_2\text{S}$  и сульфид железа  $\text{FeS}$ . Исходя из производственных данных (см. табл. 2.2), принимаем общее извлечение меди в штейн 95 %. Содержание меди в шихте (табл. 5.10) — 19,92 %. Поскольку расчет ведем на 100 кг шихты, масса меди в шихте — 19,92 кг.

Масса меди, перешедшей в штейн, составит

$$19,92 \cdot 95/100 = 18,92 \text{ кг.}$$

Плавка в печи с погружной фурмой позволяет получать штейны с высоким содержанием меди. Принимаем содержание меди в штейне 53 %, тогда масса штейна составит

$$18,92 \text{ кг меди} — 53 \%$$

$$M_{\text{шт}} — 100 \%$$

$$18,92 \cdot 100/53 = 35,7 \text{ кг.}$$

Согласно правилу В. Я. Мостовича содержание серы в штейне примем 24 %, тогда масса серы в штейне составит

$$35,7 \cdot 0,24 = 8,57 \text{ кг.}$$

В  $\text{Cu}_2\text{S}$  связано серы



$$18,92 \cdot 32/(63,5 \cdot 2) = 4,77 \text{ кг,}$$

где 18,92 — масса меди в штейне, кг;

32 — атомная масса серы, г/моль;

63,5 — атомная масса меди, г/моль.

В штейн переходит часть цинка. Содержание цинка в шихте — 1,9 % (см. табл. 5.10), в 100 кг шихты масса цинка составляет 1,9 кг. На основании производственных данных принимаем, что 25 % содержащегося в шихте цинка переходит в штейн, тогда масса цинка, перешедшего в штейн, составит

$$1,9 \cdot 25/100 = 0,475 \text{ кг.}$$

Таблица 5.10

Химический состав шихты

Материал	Доля в шихте, %	Cu		Zn		Pb		Fe		S		SiO <sub>2</sub>		CaO		Проч.	
		%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
Концентрат медный 1	33,00	18,70	6,17	2,90	0,96	0,50	0,17	30,03	9,91	37,00	12,21	3,13	1,03	0,47	0,16	7,27	2,40
Концентрат медный 2	55,00	21,60	11,88	1,46	0,80	0,25	0,13	28,92	15,91	35,12	19,31	8,56	4,71	0,99	0,54	3,11	1,71
Концентрат шлаковый	8,00	20,81	1,67	0,73	0,06	0,47	0,04	27,10	2,17	12,30	0,98	15,85	1,27	1,92	0,15	20,82	1,67
Руда сульфидная	3,00	1,00	0,03	2,81	0,08	1,60	0,05	30,50	0,91	36,82	1,10	5,23	0,16	2,60	0,08	19,44	0,58
Пыль	1,00	17,15	0,17	0,06	0,001	0,02	0,00	16,44	0,16	5,40	0,05	8,46	0,08	1,20	0,01	51,27	0,51
ИТОГО	100,00	—	19,92	—	1,90	—	0,39	—	29,06	—	33,67	—	7,25	—	0,94	—	6,87

Цинк в штейне остается в виде сульфида  $\text{ZnS}$ . Следовательно, в масса серы, связанной с цинком, составит



$$0,475 \cdot 32/65,4 = 0,23 \text{ кг.}$$

Свинец также частично перейдет в штейн в виде сульфида. Содержание свинца в шихте — 0,39 % (см. табл. 5.9), масса свинца в 100 кг шихты составляет 0,39 кг. В условиях плавки Ausmelt 88 % содержащегося в шихте свинца переходит в штейн. Масса  $\text{PbS}$ , перешедшего в штейн, составит

$$0,39 \cdot 88/100 = 0,34 \text{ кг.}$$

Масса серы, связанной со свинцом, составит



$$0,34 \cdot 32/207 = 0,05 \text{ кг.}$$

На долю  $\text{FeS}$  останется серы

$$8,57 - 4,77 - 0,23 - 0,05 = 3,52 \text{ кг.}$$

С этим количеством серы будет связано Fe

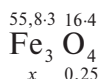
$$55,8 \cdot 3,52/32 = 6,13 \text{ кг,}$$

где 55,8 и 32 — атомные массы железа и серы, г/моль.

В состав штейна всегда входит кислород. Количество кислорода можно определить по табл. 2.3. Поскольку штейн богатый, принимаем содержание кислорода в штейне 0,7 %. В таком случае масса кислорода в 35,7 кг штейна составит

$$35,7 \cdot 0,7/100 = 0,25 \text{ кг.}$$

Кислород в штейне присутствует в виде магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Определяем массу железа в магнетите



$$(55,8 \cdot 3 \cdot 0,25)/(16 \cdot 4) = 0,65 \text{ кг.}$$

Все полученные данные заносим в таблицу рационального состава штейна и рассчитываем его химический состав (табл. 5.11).

Таблица 5.11

**Рациональный состав штейна**

Соединения	Элементы, кг							ИТОГО
	Cu	Fe	Pb	Zn	O <sub>2</sub>	S	Пр.	
Cu <sub>2</sub> S	18,92	—	—	—	—	4,77	—	23,69
FeS	—	6,13	—	—	—	3,52	—	9,65
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	0,65	—	—	0,25	—	—	0,90
PbS	—	—	0,34	—	—	0,05	—	0,39
ZnS	—	—	—	0,475	—	0,23	—	0,71
Прочие	—	—	—	—	—	—	0,37	0,37
ВСЕГО	18,92	6,78	0,34	0,475	0,25	8,57	0,37	35,70
Содержание, %	53,00	19,00	0,95	1,33	0,70	24,00	1,01	100,00

В состав прочих входят растворенные в штейне благородные металлы, шлаковые включения и другие неучтенные компоненты.

### 5.1.3. Расчет пылевыноса

В печи Ausmelt низкий уровень пылеобразования — менее 1 %. Тем не менее, в процессе плавки образуются грубые и тонкие пыли. Грубые пыли — частицы шихты, которые улавливают в циклонах и возвращают в процесс, тонкие пыли — возгоны улавливают и перерабатывают отдельно.

Сначала рассчитаем количество грубых пылей. Пылевынос принимаем 1 % от массы шихты (см. табл. 2.2). Считаем, что компоненты шихты покидают печь, не успев вступить в химические реакции. В этом случае состав грубой пыли будет соответствовать составу загруженной шихты. Масса грубой пыли при плавке 100 кг шихты составит

$$100 \cdot 1/100 = 1 \text{ кг.}$$

Массу отдельных элементов в пыли рассчитываем по формуле

$$m_{\text{пыль}}^i = m_{\text{ших}}^i \cdot 1/100,$$

где  $m_{\text{ших}}^i$  — масса элемента в шихте, кг (см. табл. 5.9).



Масса меди в пыли составит

$$19,92 \cdot 1/100 = 0,2 \text{ кг},$$

где 19,92 — масса меди в 100 кг шихты, кг (см. табл. 5.9).

Массы остальных компонентов рассчитываем аналогично расчету для меди и результаты заносим в табл. 5.12.

Таблица 5.12

Состав грубой пыли, кг

Компонент	Формула	Масса, кг
Медь	Cu	0,200
Железо	Fe	0,290
Свинец	Pb	0,004
Цинк	Zn	0,020
Сера	S	0,340
Кремнезем	SiO <sub>2</sub>	0,070
Оксид кальция	CaO	0,010
Кислород	O	0,005
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	0,010
Прочие	—	0,050
ВСЕГО	—	0,999

Далее рассчитываем технологические газы и тонкие пыли. В составе шихты есть компоненты, которые при плавке переходят в газовую фазу и образуют технологические газы. В первую очередь это сера и диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), входящий в состав кальцита CaCO<sub>3</sub>. При нагревании шихты происходит диссоциация CaCO<sub>3</sub> по реакции



Рассчитываем массу CO<sub>2</sub>, перешедшего в газ,

$$0,74 - 0,01 = 0,73 \text{ кг},$$

где 0,74 — масса CO<sub>2</sub> в шихте, кг (см. табл. 5.9);

0,01 — масса CO<sub>2</sub> в грубой пыли, кг (см. табл. 5.12).

Рассчитываем массу серы, перешедшей в газ. Сера распределяется между штейном, газом, пылью и шлаком.

Масса серы в шихте — 33,67 кг (см. табл. 5.9).

Масса серы в штейне — 8,57 кг (см. табл. 5.11).

Масса серы в грубой пыли — 0,34 кг (см. табл. 5.12).

Массу серы в шлаке рассчитаем через массу меди в шлаке, т. к. сера в шлаке присутствует в основном в виде мелких капелек штейна, не успевших отстояться. Медь при плавке распределяется между штейном, грубой пылью и шлаком.

Масса меди в шихте — 19,92 кг (см. табл. 5.9).

Масса меди в штейне — 18,92 кг (см. табл. 5.11).

Масса меди в грубой пыли — 0,2 кг (см. табл. 5.12).

В шлак переходит меди

$$19,92 - 18,92 - 0,2 = 0,8 \text{ кг.}$$

Медь в шлаке присутствует в виде оксида и сульфида меди в соотношении примерно 1:1. Таким образом, масса сульфидной меди составит

$$0,8/2 = 0,4 \text{ кг.}$$

С этим количеством меди будет связана сера в шлаке



$$0,4 \cdot 32 / (63,5 \cdot 2) = 0,1 \text{ кг.}$$

Остальная сера шихты перейдет в газ

$$33,67 - 8,57 - 0,34 - 0,1 = 24,66 \text{ кг.}$$

Степень десульфуризации составит

$$24,66 \cdot 100 / 33,67 = 73,2 \text{ \%}.$$

Полученное значение соответствует данным производственной практики (см. табл. 2.3).

В тонкие пыли (возгоны) при плавке перейдут свинец и цинк. Свинец распределяется между тонкими пылями и шлаком примерно поровну, а цинк — в соотношении 2:1.

Масса свинца в шихте — 0,39 кг (см. табл. 5.9).

Масса свинца в штейне — 0,34 кг (см. табл. 5.11).

Масса свинца в грубой пыли — 0,004 кг (см. табл. 5.12).

В таком случае масса оставшегося свинца составит

$$0,39 - 0,34 - 0,004 = 0,046 \text{ кг.}$$

В тонкие пыли перейдет половина от этого количества

$$0,046/2 = 0,023 \text{ кг.}$$

В шлак также перейдет 0,023 кг свинца.

Масса цинка в шихте — 1,9 кг (см. табл. 5.9).

Масса цинка в штейне — 0,48 кг (см. табл. 5.11).

Масса цинка в грубой пыли — 0,02 кг (см. табл. 5.12).

В таком случае масса оставшегося цинка составит

$$1,9 - 0,48 - 0,02 = 1,40 \text{ кг.}$$

В тонкие пыли перейдет  $2/3$  цинка от этого количества

$$1,4 \cdot 2/3 = 0,93 \text{ кг.}$$

В шлак перейдет  $1/3$  цинка

$$1,40 - 0,93 = 0,47 \text{ кг.}$$

Состав технологических газов и тонких пылей сводим в табл. 5.13.

Таблица 5.13

Состав технологических газов и тонких пылей, кг

Продукт	Компонент				ИТОГО
	Zn	Pb	S	CO <sub>2</sub>	
Технологический газ	—	—	24,66	0,73	25,39
Тонкие пыли	0,93	0,02	—	—	0,95

#### 5.1.4. Предварительный расчет массы и состава шлака

Массы элементов шлака при бесфлюсовой плавке определяем по разности между их массой в исходной шихте и в продуктах — штейне, грубой и тонкой пыли, технологических газах

$$m^i_{\text{шлак}} = m^i_{\text{шихта}} - m^i_{\text{штейн}} - m^i_{\text{гр. пыль}} - m^i_{\text{тон. пыль}} - m^i_{\text{техн. газ.}}$$

Расчет ведем на основании данных табл. 5.9, 5.11–5.13.

Массы меди, свинца, цинка и серы в шлаке уже рассчитаны при расчете состава газа и тонкой пыли.

Масса железа в шлаке составит

$$29,06 - 6,78 - 0,29 = 21,99 \text{ кг},$$

где 29,06 — масса железа в шихте, кг (см. табл. 5.9);

6,78 — масса железа в штейне, кг (см. табл. 5.11);

0,29 — масса железа в грубой пыли, кг (см. табл. 5.12).

Массы остальных компонентов рассчитываем аналогично расчету для железа. Полученные данные сводим в табл. 5.14.

Таблица 5.14

Состав шлака

Компонент	Формула	Масса, кг
Медь	Cu	0,80
Железо	Fe	21,99
Свинец	Pb	0,02
Цинк	Zn	0,47
Сера	S	0,10
Кремнезем	SiO <sub>2</sub>	7,18
Оксид кальция	CaO	0,93
Кислород	O	0,22
Прочие	—	5,24
ВСЕГО		36,95

Полученные данные не показывают химический состав шлака, который необходим для расчета флюсов, поэтому рассчитываем химический состав шлака. Содержание каждого элемента в шлаке определяем по формуле

$$C_{\text{шлак}}^i = m_{\text{шлак}}^i \cdot 100 / M_{\text{шлак}},$$

где  $m_{\text{шлак}}^i$  — масса отдельного элемента в шлаке, кг (см. табл. 5.14);

$M_{\text{шлак}}$  — общая масса шлака, кг.

В нашем случае  $M_{\text{шлак}} = 36,92$  кг (см. табл. 5.14).

Содержание меди в шлаке составит

$$0,8 \cdot 100 / 36,92 = 2,17 \text{ \%}.$$

Содержание остальных компонентов рассчитываем аналогично расчету содержания меди и получаем химический состав шлака (табл. 5.15).

Таблица 5.15

**Химический состав шлака бесфлюсовой плавки**

Компонент	Формула	Содержание, %
Медь	Cu	2,17
Железо	Fe	59,51
Свинец	Pb	0,05
Цинк	Zn	1,27
Сера	S	0,27
Кремнезем	SiO <sub>2</sub>	19,43
Оксид кальция	CaO	2,52
Кислород	O	0,6
Прочие	—	14,18
ВСЕГО		100,00

На основании всех полученных данных составляем предварительный материальный баланс плавки без флюсов и дутья (табл. 5.16).

**5.1.5. Расчет количества флюсов**

Основной параметр для контроля состава шлака при плавке в печи Ausmelt — соотношение Fe/SiO<sub>2</sub>, которое должно составлять 1,4. В шлаке, рассчитанном для бесфлюсовой плавки, это соотношение составляет

$$21,99/7,18 = 3,06,$$

где 21,99 и 7,18 — массы Fe и SiO<sub>2</sub> соответственно, кг (см. табл. 5.14).

Содержание CaO в шлаке должно быть на уровне 3–5 %, в расчетном шлаке содержание CaO — 2,52 % (см. табл. 5.15). Таким образом, необходимо добавить кварцевый и известковый флюсы.

Прежде чем рассчитывать количество флюсов, необходимо скорректировать полученную расчетным путем массу шлака с учетом кислорода, который необходим для окисления всех компонентов шлака.

Масса меди в шлаке — 0,8 кг (см. табл. 5.14). Медь в шлаке присутствует в виде оксида и сульфида меди в соотношении примерно 1:1. Таким образом, масса окисленной меди составит

$$0,8/2 = 0,4 \text{ кг.}$$

С этим количеством меди будет связано кислорода



$$0,4 \cdot 16 / 63,5 = 0,1 \text{ кг.}$$

Цинк и свинец переходят в шлак в виде оксидов ZnO и PbO. Масса цинка в шлаке — 0,47 кг (табл. 5.16). С этим количеством цинка связано кислорода

$$0,47 \cdot 16 / 65,4 = 0,11 \text{ кг.}$$

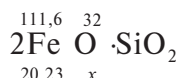
Масса свинца в шлаке — 0,02 кг (см. табл. 5.14). С этим количеством свинца связано кислорода

$$0,02 \cdot 16 / 207 = 0,002 \text{ кг.}$$

В условиях интенсивного барботажа расплава, часть железа окисляется до магнетита: по практическим данным 92 % железа в шлаке содержится в виде фаялита  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ , 8 % — в виде магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Общая масса железа в шлаке — 21,99 кг (см. табл. 5.14). Масса железа в фаялите составит

$$21,99 \cdot 0,92 = 20,23 \text{ кг.}$$

В фаялите с железом связано кислорода



$$x = 20,23 \cdot 16 \cdot 2 / (55,8 \cdot 2) = 5,8 \text{ кг.}$$

Масса железа в магнетите составит

$$21,99 \cdot 0,08 = 1,76 \text{ кг.}$$

В магнетите с железом связано кислорода



$$x = 1,76 \cdot 16 \cdot 4 / (55,8 \cdot 3) = 0,67 \text{ кг.}$$

Общая масса кислорода в шлаке для окисления всех компонентов должна быть

$$0,1 + 0,11 + 0,002 + 5,8 + 0,67 = 6,682 \text{ кг.}$$

Таблица 5.16

Предварительный материальный баланс плавки Ausmelt

Материал	M, кг	Выход, %	Cu		Zn		Pb		Fe		S		SiO <sub>2</sub>		CaO		O <sub>2</sub>		CO <sub>2</sub>		Прочие	
			%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
ЗАГРУЖЕНО																						
Шихта	100	100	19,92	19,92	1,90	1,90	0,39	0,39	29,06	29,06	33,67	33,67	7,25	7,25	0,94	0,94	0,48	0,48	0,74	0,74	5,66	5,66
ИТОГО	100	100	19,92	19,92	1,90	1,90	0,39	0,39	29,06	29,06	33,67	33,67	7,25	7,25	0,94	0,94	0,48	0,48	0,74	0,74	5,66	5,66
ПОЛУЧЕНО																						
Штейн	35,70	35,70	53,0	18,92	1,3	0,48	1,0	0,34	19,0	6,78	24,0	8,57	—	—	—	—	0,7	0,25	—	—	1,01	0,36
Грубая пыль	1,00	1,00	19,9	0,20	1,9	0,02	0,4	0,00	29,1	0,29	33,7	0,34	7,3	0,07	0,9	0,01	0,5	0,005	0,7	0,01	5,6	0,06
Газ	25,4	25,4	—	—	—	—	—	—	—	—	97,1	24,66	—	—	—	—	—	—	2,9	0,73	—	—
Тонкие пыли	0,96	0,96	—	—	97,8	0,94	2,2	0,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Шлак	36,95	36,95	2,17	0,80	1,27	0,47	0,05	0,02	59,51	21,99	0,27	0,10	19,43	7,18	2,52	0,93	0,60	0,22	—	—	14,18	5,24
ИТОГО	100,0	100,0	—	19,92	—	1,91	—	0,38	—	29,06	—	33,67	—	7,25	—	0,94	—	0,48	—	0,74	—	5,66

С учетом уже имеющегося в шлаке кислорода массой 0,22 кг (см. табл. 5.14), нужно добавить кислорода за счет дутья

$$6,682 - 0,22 = 6,46 \text{ кг кислорода.}$$

Масса шлака с учетом добавленного кислорода составит

$$36,95 + 6,46 = 43,41 \text{ кг.}$$

Обозначим массу кварцевого флюса  $x$ ; массу известняка  $y$ . Составы флюсов приведены в табл. 5.17.

Таблица 5.17

**Химический состав флюсов, %**

Материал	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	CO <sub>2</sub>	Прочие	ИТОГО
Кварц	2,00	93,00	—	—	5,00	100,00
Известняк	—	3,00	52,00	40,86	4,14	100,00

В состав известняка входит CO<sub>2</sub>, который при плавке перейдет в газовую фазу за счет протекания реакции



Содержание CO<sub>2</sub> в известняке — 40,86 % (табл. 5.17). В шлак перейдет только часть известняка — нелетучие компоненты, содержание которых в известняке составит

$$100 - 40,86 = 59,14 \text{ \%}.$$

Таким образом, в шлак перейдет от общей массы известняка 0,59у кг.

Все компоненты кварцевого флюса перейдут в шлак полностью, и масса шлака с учетом добавленных флюсов составит

$$M_{\text{шл фл}} = 43,39 + x + 0,59y.$$

Для расчета количества флюсов, оксиды железа представляем в виде общей формулы FeO. Масса FeO в шлаке составит

$$55,8 \text{ г/моль Fe входит в состав } (55,8 + 16) = 71,8 \text{ г/моль FeO}$$

$$21,99 \text{ кг Fe входит в состав } x \text{ кг FeO}$$

$$21,99 \cdot 71,8/55,8 = 28,3 \text{ кг.}$$



Оксид железа  $\text{FeO}$  входит в состав кварцевого флюса. Содержание  $\text{FeO}$  в кварцевом флюсе — 2 % (см. табл. 5.17). При добавке кварца в шлак придет  $0,02x$  кг  $\text{FeO}$ . Известняк  $\text{FeO}$  не содержит. Общая масса  $\text{FeO}$  в шлаке с флюсами составит

$$M_{\text{шл.фл}}^{\text{FeO}} = 28,3 + 0,02x.$$

С флюсами в шлак добавятся также  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$ . Для наглядности расчета на основании табл. 5.17 составим табл. 5.18.

Таблица 5.18

Расчет массы флюсов

Материал	Масса, кг	Массы компонентов, кг		
		$\text{FeO}$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$
Шлак без флюсов	43,41	28,30	7,18	0,93
Кварц	$x$	$0,02x$	$0,93x$	—
Известняк	$y$	—	$0,03y$	$0,52y$
Шлак с флюсами	$43,41 + x + 0,59y$	$28,3 + 0,02x$	$7,18 + 0,93x + 0,03y$	$0,93 + 0,52y$

Шлак, полученный после добавления флюсов, должен иметь оптимальный состав: содержать 4 %  $\text{CaO}$  и отвечать соотношению  $\text{Fe}/\text{SiO}_2 = 1,4$ . Пересчитав соотношение  $\text{Fe}/\text{SiO}_2 = 1,4$  на оксид железа  $\text{FeO}$ , получим соотношение  $\text{FeO}/\text{SiO}_2 = 1,8$  и составим систему уравнений по этим данным:

$$\begin{cases} \text{FeO}/\text{SiO}_2 = 1,8 & (28,3 + 0,02x) / (7,18 + 0,93x + 0,03y) = 1,8; \\ \text{CaO} \cdot 100 / M_{\text{шл.фл}} = 4 & (0,93 + 0,52y) \cdot 100 / (43,41 + x + 0,59y) = 4. \end{cases}$$

Решив систему уравнений, получаем, что при плавке необходимо добавить 9,22 кг кварца и 2,36 кг известняка.

При добавке такого количества известняка, в газ перейдет  $\text{CO}_2$

$$2,36 \cdot 40,86 / 100 = 0,96 \text{ кг},$$

где 40,86 — содержание  $\text{CO}_2$  в известняке, % (см. табл. 5.17).

С учетом этого в шлак перейдет от общей массы известняка

$$2,36 - 0,96 = 1,4 \text{ кг}.$$

Получаем новую массу и новый состав шлака с флюсами (табл. 5.19).

Таблица 5.19

**Состав и масса шлака при плавке с флюсами**

Материал	Масса, кг	Масса компонентов, кг								
		Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaO	O <sub>2</sub>	Пр.
Шлак без флюсов	43,41	0,8	0,47	0,02	21,99	0,1	7,18	0,93	6,68	5,24
Кварц	9,22	—	—	—	0,18	—	8,57	—	0,05	0,42
Известняк	1,4	—	—	—	—	—	0,07	1,23	—	0,1
Шлак с флюсами	54,03	0,8	0,47	0,02	22,17	0,1	15,82	2,16	6,73	5,76
Содержание, %	100,00	1,48	0,87	0,04	41,03	0,19	29,28	4,00	12,45	10,66

Проверяем соотношение

$$\text{Fe/SiO}_2 = 22,17/15,82 = 1,4.$$

Полученный шлак является удовлетворительным по основным показателям. Содержание меди в шлаке составляет 1,48 %, что вызывает необходимость переработки шлака, например, флотационным способом с получением шлакового концентрата. Полученное содержание меди в шлаке соответствует практике автогенных плавок с получением богатых штейнов.

**5.1.6. Расчет количества топлива, дутья и состава газов****Расчет количества топлива**

Печь Ausmelt позволяет использовать в качестве топлива природный газ, мелкодисперсные кокс и уголь, другие виды топлива, а также их сочетания. В качестве топлива выберем природный газ, состав которого приведен в табл. 5.20.

Таблица 5.20

**Состав природного газа**

Компонент	Формула	Содержание, об. %
Метан	CH <sub>4</sub>	95,92
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,72
Прочие	—	1,36
ИТОГО	—	100,0

Теплоту сгорания природного газа,  $\text{кДж/м}^3$ , определим по эмпирической формуле Д. И. Менделеева

$$Q_{\text{PH}} = 358,18 \cdot \% \text{CH}_4 + 637,48 \cdot \% \text{C}_2\text{H}_6$$

$$Q_{\text{PH}} = 358,18 \cdot 95,92 + 637,48 \cdot 2,72 = 36\,090,57.$$

Необходимое количество природного газа рассчитаем, зная расход условного топлива, который при плавке в печи Ausmelt составляет 1–3 % от массы шихты (см. табл. 2.2). С учетом того, что шихта содержит 28,98 % пирита, а общее содержание серы в шихте — 33,63 % (см. табл. 5.9), при плавке выделится большое количество тепла за счет протекания экзотермических реакций. Поэтому примем расход топлива минимальный — 1 % от массы шихты, тогда на массу всей шихты с флюсами потребуется условного топлива

$$(100 + 9,22 + 2,36) \cdot 1/100 = 1,12 \text{ м}^3,$$

где 100; 9,22; 2,36 — масса шихты, кварца и известняка, кг.

При сжигании такого количества условного топлива выделится тепла

$$1,12 \cdot 29\,400 = 32\,928,0 \text{ кДж},$$

где 29 400 — удельная теплота сгорания условного топлива,  $\text{кДж/м}^3$  (см. табл. 3.3).

Для получения такого количества тепла потребуется природного газа

$$32\,928,0/36\,090,58 = 0,9 \text{ м}^3.$$

Для расчета количества кислорода на сжигание газа пересчитаем объем газа на его массу по методике, рассмотренной в подгл. 3.5 (см. табл. 3.10). Получим соотношения, приведенные в табл. 5.21.

Таблица 5.21

Объемное и массовое содержание компонентов природного газа

Соединение	Содержание, об. %	Молекулярная масса, г/моль	Масса газа на объем 100 м <sup>3</sup> , кг	Содержание, мас. %
CH <sub>4</sub>	95,92	16	68,51	94,00
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,72	30	3,64	5,00
Прочие	1,36	12	0,74	1,00
ИТОГО	100,00	—	72,89	100,00

Таким образом, газ массой 72,89 кг занимает объем 100 м<sup>3</sup>, объем газа 0,9 м<sup>3</sup> будет соответствовать массе

$$72,89 \cdot 0,9/100 = 0,65 \text{ кг газа.}$$

Масса отдельных компонентов газа составит:

$$\text{CH}_4 \quad 94 \cdot 0,65/100 = 0,61 \text{ кг;}$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 \quad 5 \cdot 0,65/100 = 0,03 \text{ кг;}$$

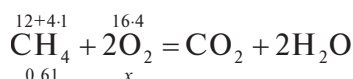
$$\text{Прочие} \quad 1 \cdot 0,65/100 = 0,006 \text{ кг.}$$

Поскольку расход топлива существенно зависит от состава исходной шихты, состава и количества подаваемого дутья, то правильность выбранного количества топлива установим после полного расчета теплового баланса процесса.

### Расчет количества дутья

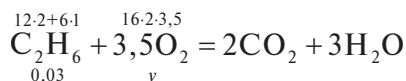
В процессе плавки в печи Ausmelt в печь подается воздух для охлаждения фурмы и КВС для окисления компонентов шихты. Поскольку в состав воздуха для охлаждения входит кислород, он также принимает участие в химических реакциях, и его необходимо учитывать при расчете.

На сжигание компонентов природного газа потребуется кислорода



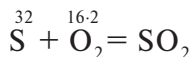
$$x = (0,61 \cdot 16 \cdot 4)/(12 + 4) = 2,44 \text{ кг,}$$

где 1, 16, 12 — атомные массы водорода, кислорода и углерода соответственно, г/моль.



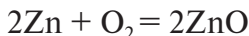
$$y = (0,03 \cdot 16 \cdot 2 \cdot 3,5)/(12 \cdot 2 + 6) = 0,11 \text{ кг.}$$

По расчету предварительного материального баланса, в газовую фазу переходит 24,66 кг серы (см. табл. 5.16). На окисление серы по реакции



потребуется 24,66 кг кислорода.

Цинк, переходящий в пыль, окисляется по реакции

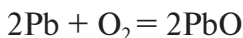


По расчету предварительного материального баланса, в тонкие пыли переходит 0,94 кг цинка (см.табл. 5.16), тогда масса кислорода на окисление цинка

$$0,94 \cdot 16/65,4 = 0,23 \text{ кг},$$

где 65,4 и 16 — атомные массы цинка и кислорода соответственно, г/моль.

Свинец, переходящий в пыль, также окисляется по реакции



По расчету предварительного материального баланса, в тонкие пыли переходит 0,02 кг свинца (см. табл. 5.16), тогда масса кислорода на окисление свинца составит

$$0,02 \cdot 16/207 = 0,002 \text{ кг},$$

где 207 и 16 — атомные массы свинца и кислорода соответственно, г/моль.

В штейне содержится 0,25 кг кислорода (см. табл. 5.11).

В шлаке содержится 6,73 кг кислорода (см. табл. 5.19).

Всего кислорода требуется

$$2,56 + 6,73 + 24,66 + 0,23 + 0,002 + 0,25 = 34,432 \text{ кг}.$$

С шихтой вносится 0,48 кг кислорода (см. табл. 5.9).

С флюсами приходит 0,05 кг кислорода (см. табл. 5.17).

Таким образом, с учетом кислорода, вносимого шихтой и флюсами, в печь теоретически необходимо подать кислорода

$$34,432 - 0,48 - 0,05 = 33,90 \text{ кг}.$$

Количество воздуха, подаваемого для охлаждения фурмы, составляет около 20 000–50 000 м<sup>3</sup>/ч; производительность печи по шихте — 40–120 т/ч (см. табл. 2.3). Состав воздуха: массовая доля кислорода —

23 % (или 21 об. %), массовая доля азота — 77 % (79 об. %), прочими составляющими пренебрегаем. Исходя из практического опыта, принимаем объем воздуха  $30\,000\text{ м}^3/\text{ч}$ , производительность печи по шихте —  $55\text{ т/ч}$ . В этом случае продолжительность переработки  $100\text{ кг}$  медь-содержащей шихты составит

$$55\,000\text{ кг} — 1\text{ ч}$$

$$100\text{ кг} — x$$

$$x = 100 \cdot 1/55\,000 = 0,00182\text{ ч.}$$

Объем охлаждающего воздуха, который нужно подать за это время, составит

$$30\,000 \cdot 0,00182 = 54,60\text{ м}^3.$$

При плотности воздуха  $1,274\text{ кг/м}^3$  масса воздуха составит

$$m = V\rho = 54,60 \cdot 1,274 = 69,56\text{ кг.}$$

С этим количеством воздуха поступит

$$\text{кислорода } 0,23 \cdot 69,56 = 16\text{ кг;}$$

$$\text{азота } 0,77 \cdot 69,56 = 53,56\text{ кг,}$$

где 0,23 и 0,77 — содержание кислорода и азота в воздухе, массовые доли ед.

С учетом количества кислорода, вносимого воздухом, через фурму теоретически необходимо подать кислорода

$$33,9 - 16,0 = 17,9\text{ кг.}$$

С учетом высокого усвоения кислорода расплавом — 95 %, необходимо подать в печь кислорода

$$17,9\text{ кг кислорода} — 95\text{ \%}.$$

$$\text{Масса } \text{O}_2 \text{ практическая} — 100\text{ \%}.$$

$$17,9 \cdot 100/95 = 18,8\text{ кг.}$$

В качестве дутья используем КВС с содержанием массовой доли кислорода 35 %. Масса КВС составит

$$18,8\text{ кг кислорода} — 35\text{ мас. \%}.$$

Масса КВС — 100 мас. %.

$$18,8 \cdot 100/35 = 53,71 \text{ кг.}$$

С КВС поступит азота

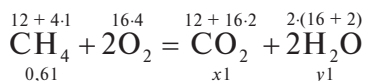
$$53,71 - 18,8 = 34,91 \text{ кг.}$$

После подачи флюсов и дутья изменится состав и количество отходящих газов и тонкой пыли. Составы этих продуктов плавки без флюсов и дутья приведены в табл. 5.16. Теперь к этому количеству добавится кислород на окисление серы и компонентов тонких пылей;  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  от горения топлива;  $\text{CO}_2$  от диссоциации  $\text{CaCO}_3$  известняка флюса. В отходящие газы перейдет также весь азот воздуха, КВС и неизрасходованный кислород.

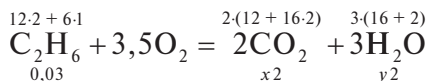
Масса азота в отходящих газах составит

$$53,56 (\text{N}_2 \text{ воздуха на охлаждение фурмы}) + 34,91 (\text{N}_2 \text{ КВС}) = 88,47 \text{ кг.}$$

Масса  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  от реакций горения топлива



$$x_1 = 1,68 \text{ кг; } y_1 = 1,37 \text{ кг;}$$



$$x_2 = 0,1 \text{ кг; } y_2 = 0,04 \text{ кг.}$$

Масса  $\text{H}_2\text{O}$  в отходящих газах

$$1,37 + 0,04 = 1,41 \text{ кг.}$$

Масса  $\text{CO}_2$  в отходящих газах

$$1,68 + 0,10 + 0,73 + 0,97 = 3,48 \text{ кг,}$$

где 0,73 — масса  $\text{CO}_2$ , перешедшая в газ из шихты (см. табл. 5.16);

0,97 — масса  $\text{CO}_2$ , перешедшая в газ из известкового флюса, кг.

Масса серы в газах не изменится и составит 24,66 кг (см. табл. 5.16). Поскольку сера показана в элементном виде, то в таблице состава газов массу кислорода, связанного с серой в  $\text{SO}_2$ , покажем в графе « $\text{O}_2$ ».

Масса кислорода в отходящих газах составит

$$24,66 + (18,8 - 17,86) = 25,56 \text{ кг,}$$

где 24,66 — масса кислорода в  $\text{SO}_2$ , кг;

18,8 — масса  $\text{O}_2$ , поданная в печь в КВС, (практическая), кг;

17,86 — масса  $\text{O}_2$ , усвоенного расплавом, (теоретическая), кг.

Получаем новую массу и состав тонких пылей и газов (табл. 5.22—5.23).

Таблица 5.22

Состав тонких пылей

Показатель	Компонент			
	Zn	Pb	$\text{O}_2$	ИТОГО
Масса, кг	0,94	0,02	0,23	1,19
Содержание, %	78,80	1,78	19,42	100,00

Таблица 5.23

Состав отходящих газов

Показатель	Компонент					ИТОГО
	$\text{CO}_2$	S	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	
Масса, кг	3,48	24,66	25,56	88,47	1,41	143,58
Содержание, мас. %	2,42	17,17	17,83	61,60	0,98	100,00

Все полученные данные сводим в итоговую таблицу материального баланса (табл. 5.24).

Невязка баланса по столбцам « $\text{O}_2$ », «Прочие» и « $\text{CO}_2$ » возникает из-за того, что часть кислорода учитывается в составе  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  попадает в «Прочие», а исходные компоненты топлива учтены в графе «Прочие».

## 5.2. Расчет теплового баланса плавки Ausmelt

Расчет теплового баланса ведем на основе материального баланса по методике, рассмотренной в гл. 3. Массы и состав материалов, подаваемых в печь, а также продуктов процесса приведены в табл. 5.24.

### 5.2.1. Приход тепла

Количество тепла, вносимого в печь шихтовыми материалами, кДж, рассчитываем по формуле



$$Q = mc_p t,$$

где  $m$  — масса материала, кг;

$c_p$  — удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·град);

$t$  — температура материала, °С.

Принимаем, что шихта, флюсы, воздух и КВС поступают в печь с температурой 20 °С.

Теплоемкость медьсодержащей шихты (без учета флюсов) рассчитали по методике, рассмотренной в подгл. 3.4 (см. табл. 3.6), через удельные теплоемкости отдельных компонентов и их содержание в шихте (см. табл. 5.9) по формуле

$$C_{\text{общ}} = \sum c_i \cdot n_i,$$

где  $n_i$  — содержание отдельных компонентов в шихте, доли ед.

Теплоемкость шихты — 0,94 кДж/(кг·град).

Тепло, вносимое медьсодержащей шихтой, составит

$$Q_{\text{шихта}} = 100 \cdot 0,94 \cdot 20 = 1\,880 \text{ кДж.}$$

Аналогично вышеприведенному расчету теплоемкости шихты определяем теплоемкость кварца и известняка с помощью составленной табл. 5.24.

Тепло, вносимое кварцем, составит

$$Q_{\text{кварц}} = 9,22 \cdot 1,122 \cdot 20 = 206,89 \text{ кДж,}$$

где 9,22 — масса кварца, кг (табл. 5.25).

Таблица 5.24

**Теплоемкость флюсов**

Компонент	Содержание, %	$c_p$ , кДж/(кг·град)	Доля в общей теплоемкости, кДж/(кг·град)
Кварцевый флюс			
SiO <sub>2</sub>	93,00	1,134	$93 \cdot 1,134 / 100 = 1,055$
FeO	2,00	0,84	0,017
Прочие	5,00	1,00	0,05
ИТОГО теплоемкость кварцевого флюса			1,122
Известняк			
SiO <sub>2</sub>	3,00	1,134	0,034
CaCO <sub>3</sub>	92,86	1,042	0,967
Прочие	4,14	1,00	0,041
ИТОГО теплоемкость известняка			1,042

Таблица 5.25

Материальный баланс плавки Ausmelt (на сухую массу)

Материал	M, кг	Выход, %	Cu		Zn		Pb		Fe		S		SiO <sub>2</sub>		CaO		O <sub>2</sub>		CO <sub>2</sub>		Прочие	
			%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
ЗАГРУЖЕНО																						
Шихта	100,0	42,46	19,92	19,92	1,90	1,90	0,39	0,39	29,1	29,06	33,67	33,67	7,25	7,25	0,94	0,94	0,48	0,48	0,74	0,74	5,66	5,66
Кварц	9,22	3,92	—	—	—	—	—	—	2,00	0,18	—	—	93,00	8,57	—	—	0,57	0,05	—	—	4,43	0,41
Известняк	2,36	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,0	0,07	52	1,23	—	—	40,86	0,97	4,14	0,10
Топливо	0,65	0,28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0	0,65
Дутье	53,71	22,81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35,0	18,80	—	—	65,00	34,91
Воздух на охлаждение фурмы	69,56	29,54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21,0	16,0	—	—	79,00	53,56
ИТОГО	235,50	100,0	—	19,92	—	1,90	—	0,39	—	29,25	—	33,67	—	15,89	—	2,17	—	32,83	—	1,70	—	95,02
ПОЛУЧЕНО																						
Штейн	35,70	15,16	53,0	18,92	1,3	0,47	1,0	0,340	19,0	6,78	24,0	8,57	—	—	—	—	0,7	0,25	—	—	1,00	0,36
Грубая пыль	1,00	0,42	19,9	0,20	1,9	0,02	0,4	0,004	29,1	0,29	33,7	0,34	7,3	0,07	0,9	0,01	0,5	0,005	0,7	0,01	5,60	0,06
Газ	143,62	60,97	—	—	—	—	—	—	—	—	17,17	24,66	—	—	—	—	17,83	25,60	2,42	3,47	62,60	89,88
Тонкие пыли	1,19	0,51	—	—	78,8	0,94	1,8	0,020	—	—	—	—	—	—	—	—	19,4	0,23	—	—	—	—
Шлак	54,03	22,94	1,48	0,80	0,87	0,47	0,04	0,020	41,1	22,18	0,19	0,10	29,28	15,82	4,00	2,16	12,45	6,73	—	—	10,66	5,76
ИТОГО	235,5	100,0	—	19,92	—	1,90	—	0,390	—	29,25	—	33,67	—	15,89	—	2,17	—	32,83	—	3,48	—	96,02
Невязка				0		0		0		0		0		0		0		2,51		−1,77		−0,77

Тепло, вносимое известняком, составит

$$Q_{\text{изв}} = 2,36 \cdot 1,042 \cdot 20 = 49,18 \text{ кДж},$$

где 2,36 — масса известняка, кг (см. табл. 5.25).

Теплоемкость воздуха, подаваемого на охлаждение фурмы, составляет 1,302 кДж/(м<sup>3</sup>·град) (см. табл. 3.8). Объем воздуха — 54,6 м<sup>3</sup>. Тепло, вносимое воздухом, составит

$$Q_{\text{возд}} = 54,6 \cdot 1,302 \cdot 20 = 1\,421,78 \text{ кДж}.$$

Масса КВС — 53,71 кг, содержание кислорода — 35 %, азота — 65 %. Плотность КВС составит

$$0,35 \cdot 1,47 + 0,65 \cdot 1,25 = 1,327 \text{ кг/м}^3,$$

где 1,47 и 1,25 — плотности газов кислорода и азота в нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

Объем КВС

$$53,71/1,327 = 40,47 \text{ м}^3.$$

Для определения теплоемкости КВС пересчитаем массовые доли в объемные (табл. 5.26) по методике, рассмотренной в подгл. 3.5.

Таблица 5.26

Состав КВС

Компонент	Содержание, мас. %	Молекулярная масса, г/моль	Объем, м <sup>3</sup>	Содержание, об. %
O <sub>2</sub>	35,00	32	$35 \cdot 22,4/32 = 24,5$	$24,5 \cdot 100/76,5 = 32,0$
N <sub>2</sub>	65,00	28	$65 \cdot 22,4/28 = 52,0$	$52 \cdot 100/76,5 = 68,0$
ИТОГО	100,00	—	76,50	100,00

Теплоемкость КВС составит

$$0,32 \cdot 0,934 + 0,68 \cdot 1,30 = 1,183 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{град)},$$

где 0,32 и 0,68 — содержание кислорода и азота в КВС, доли ед.;

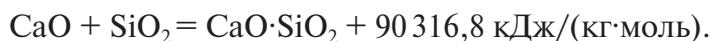
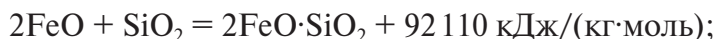
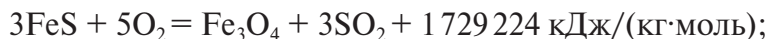
0,934 и 1,3 — теплоемкости кислорода и азота соответственно (см. табл. 3.9), кДж/(м<sup>3</sup>·град).

Тепло, вносимое КВС, составит

$$40,47 \cdot 1,183 \cdot 20 = 957,52 \text{ кДж}.$$

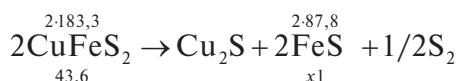
Рассчитываем тепло основных экзотермических реакций по методике, рассмотренной в подгл. 3.2. Основное количество тепла в процесс плавки поступает за счет реакций шлакообразования и окисления серы.

Реакции шлакообразования



Масса FeS в шихте — 1,70 кг (см. табл. 5.9).

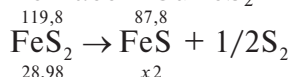
Образуется FeS по реакциям диссоциации высших сульфидов



$$x_1 = 43,6 \cdot 175,6/366,2 = 20,9 \text{ кг},$$

где 43,6 — масса CuFeS<sub>2</sub> в шихте, кг (см. табл. 5.9);

183,3 и 87,8 — атомные массы CuFeS<sub>2</sub> и FeS, г/моль.



$$x_2 = 28,98 \cdot 87,2/119,8 = 21,09 \text{ кг},$$

где 28,98 — масса FeS<sub>2</sub> в шихте, кг (см. табл. 5.9);

119,8 и 87,8 — атомные массы FeS<sub>2</sub> и FeS, г/моль.

Общая масса FeS составит

$$1,70 + 20,9 + 21,09 = 43,69 \text{ кг},$$

в грубую пыль перешло 1 % от этой массы, в реакции вступает 99 %

$$43,69 \cdot 0,99 = 43,25 \text{ кг}.$$

В штейн перешло 9,65 кг FeS (см. табл. 5.11). На реакции шлакообразования осталось FeS

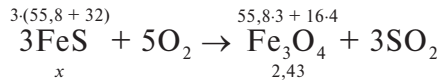
$$43,25 - 9,65 = 33,60 \text{ кг}.$$

Рассмотрим образование магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Магнетит содержится в шлаке и штейне. С исходной шихтой поступает 0,9 кг  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (см. табл. 5.9). В штейне содержится 0,9 кг  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (см. табл. 5.11), таким образом, весь магнетит шихты переходит в штейн, и его не учитываем в реакциях шлакообразования. При расчете количества флюсов и дутья определили массу железа в шлаке в виде фаялита  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$  и в виде магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Масса железа в магнетите составила 1,76 кг, с ним связано кислорода 0,67 кг. Общая масса  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

$$1,76 + 0,67 = 2,43 \text{ кг.}$$

Для получения такого количества магнетита необходимо окислить FeS



$$x = 2,43 \cdot 3 \cdot (55,8 + 32) / (55,8 \cdot 3 + 16 \cdot 4) = 2,77 \text{ кг.}$$

Тепловой эффект реакции образования магнетита составит

$$Q_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = mQ_n/M = 2,77 \cdot 1\,729\,224 / (3 \cdot (55,8 + 32)) = 18\,185,08 \text{ кДж.}$$

На образование магнетита израсходовано 2,77 кг FeS, остается на реакцию  $2\text{FeS} + 3\text{O}_2 = 2\text{FeO} + 2\text{SO}_2 + 937\,340 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{моль})$ ;

$$33,60 - 2,77 = 30,83 \text{ кг FeS.}$$

Тепловой эффект реакции окисления FeS составит

$$Q_{\text{FeS}} = 30,83 \cdot 937\,340 / (2 \cdot (55,8 + 32)) = 164\,568,29 \text{ кДж.}$$

Масса железа в шлаке в виде фаялита — 20,23 кг, с ним связано кислорода 5,8 кг. Общая масса FeO в фаялите составит

$$20,23 + 5,8 = 26,03 \text{ кг.}$$

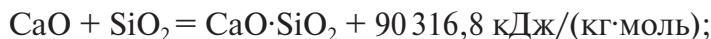
Тепловой эффект реакции образования фаялита составит

$$2\text{FeO} + \text{SiO}_2 = 2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2 + 92\,110 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{моль});$$

$$Q_{\text{FeO}} = 26,03 \cdot 92\,110 / (2 \cdot 71,8) = 16\,696,54 \text{ кДж,}$$

где 71,8 — атомная масса FeO, г/моль.

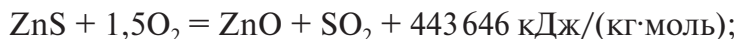
Масса CaO в шлаке — 2,16 кг (см. табл. 5.24). Тепловой эффект реакции образования силиката кальция



$$Q_{\text{CaO}} = 2,16 \cdot 90\,316,8/56 = 3\,483,65 \text{ кДж},$$

где 56 — атомная масса CaO, г/моль.

В шихте содержится 2,82 кг ZnS (см. табл. 5.9), в штейн переходит 0,71 кг (см. табл. 5.11). Тепло от окисления оставшегося сульфида цинка определяется по реакции

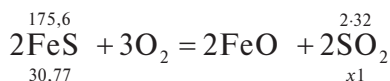


$$Q_{\text{ZnS}} = (2,82 - 0,71) \cdot 443\,646/97,4 = 9\,610,81 \text{ кДж}.$$

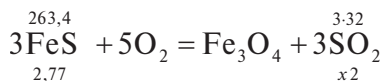
Реакция окисления серы



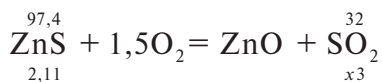
В газовую фазу переходит 24,66 кг серы (см. табл. 5.25). Однако часть тепла, выделившегося за счет окисления серы, уже учли при расчете реакций шлакообразования. По этим реакциям выделится и окислится серы



$$x_1 = 30,77 \cdot 2 \cdot 32/175,6 = 11,21 \text{ кг};$$



$$x_2 = 2,77 \cdot 3 \cdot 32/263,4 = 1,01 \text{ кг};$$



$$x_3 = 2,11 \cdot 32/97,4 = 0,69 \text{ кг}.$$

Осталось серы на реакцию окисления

$$24,66 - 11,21 - 1,01 - 0,69 = 11,75 \text{ кг}.$$

Тепловой эффект реакции окисления серы

$$Q_s = 11,75 \cdot 298\,032/32 = 109\,433,63 \text{ кДж}.$$

Итак, тепло, выделившееся при протекании экзотермических реакций, будет

$$Q_{\text{экз}} = 164\,568,29 + 18\,185,08 + 9\,610,81 + 109\,433,63 + \\ + 3\,483,65 + 16\,696,54 = 321\,978,00 \text{ кДж.}$$

Тепло от сгорания топлива

$$0,9 \cdot 36\,090,58 = 32\,481,52 \text{ кДж,}$$

где 0,9 — объем природного газа, м<sup>3</sup>;

36 090,58 — теплотворная способность газа, кДж/м<sup>3</sup>.

### 5.2.2. Расход тепла

Количество тепла, уносимого из печи продуктами плавки, кДж, рассчитываем по формуле

$$Q = mc_p t,$$

где  $m$  — масса материала, кг (см. табл. 5.25);

$c_p$  — удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·град);

$t$  — температура материала, °С.

Продукты плавки покидают печь с температурой 1200 °С. Массы продуктов плавки и их состав приведены в таблице полного материального баланса (см. табл. 5.25).

Для расчета уносимого тепла определим удельные теплоемкости каждого продукта плавки.

Теплоемкость грубой пыли соответствует теплоемкости шихты 0,94 кДж/(кг·град).

Теплоемкости остальных продуктов рассчитаем по методике, рассмотренной в подгл. 3.4 (см. табл. 3.6), с помощью составленной табл. 5.27. Теплоемкости отдельных веществ находим по табл. 3.5 и 3.8.

Содержание железа в шлаке (41,03 %) пересчитываем на содержание FeO, содержание цинка (0,87 %) — на содержание ZnO.

Таблица 5.27

**Теплоемкость продуктов плавки**

Компонент	Содержание, %	$c_p$ , кДж/(кг·град)	Доля в общей теплоемкости, кДж/(кг·град)
<b>Штейн</b>			
$\text{Cu}_2\text{S}$	66,36	0,475	$66,36 \cdot 0,475/100 = 0,315$
$\text{FeS}$	27,02	0,570	0,154
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	2,53	0,609	0,015
$\text{PbS}$	1,10	0,214	0,002
$\text{ZnS}$	1,98	0,517	0,010
Прочие	1,01	0,5	0,005
<b>ИТОГО теплоемкость штейна</b>			0,501
<b>Шлак</b>			
$\text{Cu}_2\text{S}$	2,95	0,475	0,014
$\text{ZnO}$	0,88	0,84	0,007
$\text{SiO}_2$	29,3	1,134	0,332
$\text{CaO}$	4,00	1,05	0,042
$\text{FeO}$	52,83	0,84	0,444
<b>ИТОГО теплоемкость шлака</b>			0,839
<b>Тонкие пыли</b>			
$\text{ZnO}$	98,28	0,84	0,826
$\text{PbO}$	1,72	0,14	0,002
<b>ИТОГО теплоемкость тонкой пыли</b>			0,828

Тепло, уносимое штейном, составит

$$Q_{\text{штейн}} = 35,70 \cdot 0,501 \cdot 1200 = 21\,462,84 \text{ кДж.}$$

Тепло, уносимое шлаком, составит

$$Q_{\text{шлак}} = 54,03 \cdot 0,839 \cdot 1200 = 54\,397,4 \text{ кДж.}$$

Тепло, уносимое грубой пылью, составит

$$Q_{\text{гр.пыль}} = 1,00 \cdot 0,94 \cdot 1200 = 1\,128,00 \text{ кДж.}$$

Тепло, уносимое тонкой пылью, составит

$$Q_{\text{т.пыль}} = 1,42 \cdot 0,828 \cdot 1200 = 1\,410,91 \text{ кДж.}$$

**Тепло, уносимое газами.** Пересчитаем массу отходящих газа в объем, а содержание компонентов — из массовой доли в объемную, в процентах (табл. 5.28) по методике, рассмотренной в подгл. 3.5.



Состав газа в массовых долях приведен в табл. 5.23.

Серу в газе представим в виде  $\text{SO}_2$ : при содержании массовой доли серы в газе 17,17 %, содержание массовой доли  $\text{SO}_2$  составит 34,34 %. Соответственно снизится содержание свободного кислорода

$$17,83 - 17,17 = 0,65 \%$$

Таблица 5.28

**Состав отходящих газов**

Соединение	Содержание, мас. %	Молекулярная масса, г/моль	Объем, м <sup>3</sup>	Содержание, об. %
$\text{CO}_2$	2,42	44	$2,42 \cdot 22,4/44 = 1,23$	$1,23 \cdot 100/64,21 = 1,91$
$\text{SO}_2$	34,34	64	12,02	18,73
$\text{O}_2$	0,65	32	0,46	0,71
$\text{N}_2$	61,60	28	49,28	76,75
$\text{H}_2\text{O}$	0,98	18	1,22	1,90
Прочие	0,01	—	—	—
ИТОГО	100,00		64,21	100,0

Таким образом, газ массой 100 кг занимает объем 64,21 м<sup>3</sup>. Масса газа составляет 143,62 кг (см. табл. 5.23), объем газа составит

$$143,62 \cdot 64,21/100 = 92,22 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем теплоемкость газа (табл. 5.29) аналогично теплоемкости твердых продуктов плавки. Теплоемкости отдельных соединений газа при температуре 1200 °С находим по табл. 3.9.

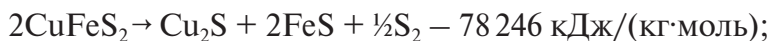
Таблица 5.29

**Теплоемкость отходящих газов**

Компонент газа	Содержание, об. %	$c_p$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·град)	Теплоемкость компонента в газе, кДж/(м <sup>3</sup> ·град)
$\text{CO}_2$	1,92	0,044	0,044
$\text{SO}_2$	18,72	0,428	0,428
$\text{O}_2$	0,71	0,008	0,008
$\text{N}_2$	76,75	1,089	1,089
$\text{H}_2\text{O}$	1,90	0,034	0,034
ИТОГО теплоемкость отходящих газов			1,603

$$Q_{\text{газ}} = 92,22 \cdot 1,603 \cdot 1200 = 177\,394,39 \text{ кДж.}$$

Тепло, затраченное на основные эндотермические реакции — диссоциацию халькопирита, пирита и известняка, составит



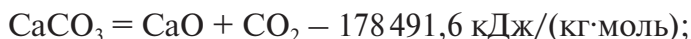
$$Q_{\text{CuFeS}_2} = 43,6 \cdot 78\,246 / (183,3 \cdot 2) = 9\,305,85 \text{ кДж},$$

где 43,60 — масса  $\text{CuFeS}_2$  в шихте (см. табл. 5.9), кг.



$$Q_{\text{FeS}_2} = 28,98 \cdot 83\,160 / 119,8 = 20\,116,67 \text{ кДж},$$

где 28,98 — масса  $\text{FeS}_2$  в шихте (см. табл. 5.9), кг.



$$Q_{\text{CaCO}_3} = 3,87 \cdot 178\,491,6 / 100 = 6\,907,62 \text{ кДж},$$

где 3,87 — общая масса  $\text{CaCO}_3$  в шихте (см. табл. 5.9) и флюсе, кг.

Итак, тепло, затраченное на эндотермические реакции, составит

$$Q_{\text{энд}} = 6\,907,62 + 9\,305,85 + 20\,116,67 = 36\,330,13 \text{ кДж}.$$

**Тепло на испарение влаги шихты.** Материальный баланс рассчитали на сухую массу шихты и флюсов, но в печь Ausmelt шихту подают с влажностью до 10 %, и в расчете теплового баланса необходимо учесть расход тепла на испарение влаги шихты. Примем среднюю влажность шихты и флюсов 4 % от сухой массы, тогда с шихтой и флюсами поступит влаги

$$(100 + 9,22 + 2,36) \cdot 4 / 100 = 4,46 \text{ кг},$$

где 100; 9,22; 2,36 — массы медьсодержащей шихты, кварца и известняка соответственно (см. табл. 5.25), кг.

Воду, поступающую с шихтой, необходимо нагреть до 100 °С, перевести в пар, после чего пар вместе с газами уйдет из печи, унеся с собой тепло.

Затраты тепла на нагрев влаги шихты до 100 °С составят

$$Q_{\text{нагрев воды}} = mc_p \cdot \Delta t = 4,46 \cdot 4,19 \cdot (100 - 20) = 1\,494,99 \text{ кДж},$$

где 4,19 — теплоемкость воды, кДж/(кг·град);

100 — температура кипения воды, °С;

20 — температура влаги в шихте, °С.

Затраты тепла на испарение влаги шихты составят

$$Q_{\text{испар воды}} = 4,46 \cdot 2260 = 10\,079,6 \text{ кДж},$$

где 2260 — удельная теплота парообразования воды, кДж/кг.

Образовавшийся водяной пар займет объем

$$4,46 \cdot 22,4/18 = 5,55 \text{ м}^3,$$

где 18 — молекулярная масса воды, г/моль.

С таким объемом водяного пара уйдет тепла

$$Q_{\text{пар}} = 5,55 \cdot 1,781 \cdot 1200 = 11\,861,46 \text{ кДж},$$

где 1,781 — теплоемкость водяного пара при температуре 1200 °С, кДж/(м<sup>3</sup>·град).

Общее количество тепла на удаление влаги шихты составит

$$Q_{\text{влага шихты}} = 1\,494,99 + 10\,079,6 + 11\,861,46 = 23\,436,05 \text{ кДж}.$$

**Расход тепла на нагрев воды в кессонах.** Используем систему водяного охлаждения. Как было определено при расчете воздуха на охлаждение фурмы, при средней производительности печи 55 т/ч, продолжительность переработки 100 кг медьсодержащей шихты составит

$$x = 100 \cdot 1/55\,000 = 0,0018 \text{ ч}.$$

Расход охлаждающей воды в кессонах при использовании системы водяного охлаждения составляет 300 м<sup>3</sup>/ч. Масса 300 м<sup>3</sup> воды — 300 000 кг. Расход охлаждающей воды в пересчете на 100 кг шихты составит

$$300\,000 \cdot 0,0018 = 540,0 \text{ кг}.$$

Поступающая в кессоны вода имеет температуру 40 °С, покидает кессоны с температурой 50 °С. Затраты тепла на нагрев воды в кессонах составят

$$Q_{\text{нагрев воды}} = mc_p \cdot \Delta t = 540 \cdot 4,19 \cdot (50 - 40) = 22\,626,0 \text{ кДж},$$

где 4,19 — теплоемкость воды, кДж/(кг·град).

Все полученные данные сводим в таблицу теплового баланса (табл. 5.30) и определяем долю каждой статьи баланса в общем приходе и расходе тепла. Потери тепла в окружающее пространство через

корпус, лещадь печи и другие неучтенные потери находим как разность между приходной и расходной частью теплового баланса.

Таблица 5.30

## Тепловой баланс плавки Ausmelt

Приход тепла			Расход тепла		
Статья баланса	кДж	%	Статья баланса	кДж	%
Шихта	1 880,00	0,52	Штейн	21 462,840	5,98
Кварц	206,89	0,06	Шлак	54 397,40	15,15
Известняк	49,18	0,014	Грубая пыль	1 128,00	0,31
КВС	957,52	0,27	Газ	177 394,39	49,43
Воздух на охлаждение фурмы	1 582,31	0,44	Тонкие пыли	1 410,91	0,33
Экзотермические реакции	321 978,00	89,66	Эндотермические реакции	36 330,14	10,12
Горение топлива	32 481,52	9,04	Испарение влаги шихты и тепло, уносимое водяным паром	23 436,05	6,53
ИТОГО	359 135,42	100,00	Водяное охлаждение	22 626,00	6,3
			Неучтенные потери	21 056,25	5,85
			ИТОГО	335 805,93	100,00

Количество тепла, получаемого в результате экзотермических реакций, составляет в общем балансе 89,66 %. Неучтенные потери тепла должны быть не более 10–12 % в общем балансе, в нашем случае они составили 5,85 % в общих затратах тепла, что укладывается в допустимые значения.

### Контрольные вопросы

1. В чем преимущества автогенных процессов плавки?
2. Что подают в печь через вертикальную фурму?
3. Какое химическое соединение составляет основу гарнисажа фурмы?
4. Где происходит разделение штейно-шлаковой эмульсии?
5. Какое соотношение является основным при расчете флюсов?

---

## 6. Конвертирование медных штейнов

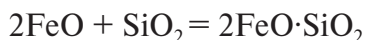
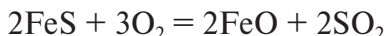
---

**В** результате плавки сульфидных медных концентратов и других медьсодержащих материалов получают медные штейны, состав которых зависит от состава исходного сырья и процесса плавки. Основу медных штейнов составляют два устойчивых, хорошо растворимых друг в друге сульфида —  $\text{Cu}_2\text{S}$  и  $\text{FeS}$ . Содержание меди в штейнах отечественных предприятий составляет 30–55 %, серы — 24–26 %. Суммарное содержание меди, серы и железа в медных штейнах — 90–95 %. Кроме этого, в состав штейна входят благородные металлы, кислород (в виде магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и в небольшом количестве цинк, свинец и другие металлы, переходящие в штейн из исходного сырья.

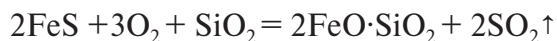
Задачей конвертирования является удаление из штейна железа и серы и получение черновой меди с содержанием 97–99,5 %  $\text{Cu}$ . При конвертировании железо переводят в шлак, а серу — в газовую фазу. Добиться этого можно путем окисления железа и серы, поэтому конвертирование — это окислительный процесс, требующий подачи дутья. В качестве дутья на отечественных и большинстве зарубежных предприятий используют воздух. Все физико-химические процессы в конвертере протекают в условиях непрерывной циркуляции расплава, связанной с интенсивной подачей дутья. При конвертировании, дутье подается непосредственно в расплав и в зоне интенсивного барботажа скорость окисления сульфидов очень велика, что обеспечивает практически полное усвоение кислорода расплавом (93–95 %).

При окислении сульфидов выделяется большое количество тепла, что позволяет вести процесс без подачи топлива: конвертирование является автогенным процессом, но его существенным недостатком является периодичность. Процесс конвертирования делится по организации работы на периоды набора белого матта и варки черновой меди, а по химическим процессам на первый и второй периоды.

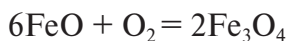
В первом периоде окисляют и переводят в шлак железо в виде фаялита  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ , для чего в конвертер подают дутье и кварцевый флюс. Сера, связанная с железом в  $\text{FeS}$ , окисляется и переходит в газ в виде диоксида серы



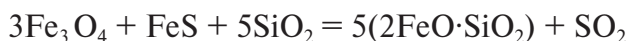
Суммарное уравнение первого периода будет выглядеть следующим образом:



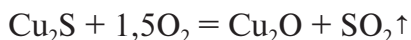
В первом периоде за счет окисления части  $\text{FeO}$  кислородом образуется магнетит



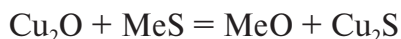
Образование магнетита снижает производительность конвертера, т. к. на окисление 1 кг железа до  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  необходимо в 1,3 раза больше кислорода, чем на его окисление до  $\text{FeO}$ . Повышенное содержание магнетита в конвертерном шлаке увеличивает вязкость, плотность и температуру плавления шлака, что приводит к потерям меди со шлаком. Восстановить магнетит сульфидом железа можно лишь в верхних слоях расплава, где магнетит, вынесенный вверх потоком газов, вступает в реакцию с кварцевым флюсом [4],



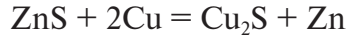
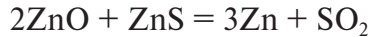
Кварцевый флюс загружают в конвертер в виде кусков размером до 100 мм, но т. к. плотность кварца составляет  $2,5 \text{ г/см}^3$ , что меньше плотности шлака ( $3,7\text{--}4 \text{ г/см}^3$ ) и штейна (порядка  $5 \text{ г/см}^3$ ), то даже при активном перемешивании ванны, куски кварца не могут проникнуть глубоко в расплав и формирование шлака лимитируется скоростью растворения флюса. Поэтому образовавшийся шлак периодически сливают, в конвертер заливают новую порцию штейна, и цикл повторяется. В первый период  $\text{Cu}_2\text{S}$  также реагирует с кислородом



но пока в штейне есть  $\text{FeS}$  или сульфиды других металлов ( $\text{Zn}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{As}$  и др), сульфид меди практически не окисляется за счет протекания реакции



Цинк удаляется из штейна почти полностью, распределяясь между шлаком и пылью



В горловине конвертера пары металлического цинка окисляются кислородом воздуха до  $\text{ZnO}$  и уносятся с пылью. Чем выше температура в конвертере, тем больше удаляется цинка в газ в виде оксида, при более низких температурах цинк большей частью переходит в шлак.  $\text{PbS}$  легко окисляется в первом периоде, образуя  $\text{PbO}$  и  $\text{SO}_2$ , и удаляется с газами и пылью.  $\text{Au}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Se}$  и  $\text{Te}$  большей частью остаются в черновой меди.

Штейн, заливаемый в конвертер, имеет температуру около  $1100^\circ\text{C}$ , но в первом периоде, из-за интенсивного окисления сульфида железа, температура в конвертере повышается со скоростью  $5\text{--}7^\circ\text{C}$  в минуту. Продолжительность одной продувки составляет 40 мин, за это время температура поднимается до  $1200\text{--}1240^\circ\text{C}$ . Чтобы избежать перегрева расплава, в конвертер загружают холодные присадки: медный лом, корки штейна из штейновых ковшей, богатые шлаки от огневого рафинирования меди, настыли с горловины конвертера и т. п. Количество холодных присадок зависит от состава штейна (рис. 6.1) [4].

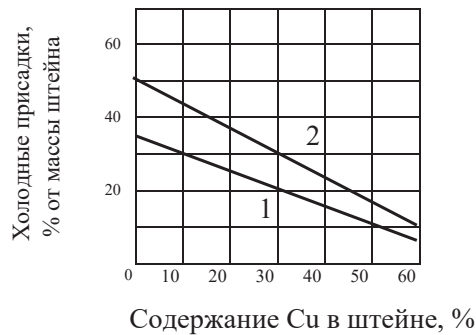


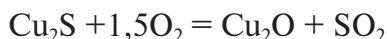
Рис. 6.1. Зависимость количества холодных присадок от состава штейна:

1 — воздушное дутье (21 об. %  $\text{O}_2$ ); 2 — дутье КВС 25 (об. %  $\text{O}_2$ )

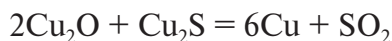
Первый период конвертирования идет циклично: после каждой заливки штейна и его продувки сливают шлак и заливают следующую порцию штейна, затем вновь проводят продувку и сливают шлак, и так несколько раз, до набора достаточного количества богатой массы. За-

канчивается первый период холостой продувкой для полного окисления сульфидов железа и получения белого матта, почти чистого  $\text{Cu}_2\text{S}$  (78–80 % Cu, 20–21 % S).

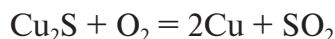
Второй период конвертирования идет непрерывно и без загрузки флюсов и холодных материалов. В конвертер подают только дутье для окисления сульфида меди. Сначала  $\text{Cu}_2\text{S}$  переходит в  $\text{Cu}_2\text{O}$  по экзотермической реакции



Образовавшийся оксид меди сразу вступает во взаимодействие с оставшимся сульфидом меди с образованием металлической меди по эндотермической реакции



Суммарная реакция второго периода конвертирования



Образовавшаяся металлическая медь сначала растворяется в белом матте, а когда содержание меди в белом матте достигает 82 %, медь образует нижний слой, т. к. ее плотность больше плотности  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Содержание серы в расплаве в течение второго периода конвертирования снижается с 19–20 % до 0,03–0,04 %. Черновая медь направляется на рафинирование для получения товарной меди и извлечения примесей (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Состав черновой меди, %

Марка	Примесей, не более					
	Cu+Au+Ag	Sb	As	Ni	Bi	Pb
МЧ0	99,5	0,03	0,03	0,10	0,002	0,10
МЧ1	99,4	0,05	0,05	0,20	0,005	0,10
МЧ2	99,2	0,08	0,08	0,30	0,010	0,20
МЧ3	98,8	0,15	0,15	0,75	0,020	0,20
МЧ4	98,3	0,20	0,20	0,85	0,030	0,40
МЧ5	97,5	0,30	0,30	1,50	0,040	0,40
МЧ6	96,0	0,35	0,35	Не орг.	0,050	0,60

Содержание меди в конвертерных шлаках составляет 1–6 %, кремнезема — 20–30 %. Медь в шлаке находится в основном в виде меха-



нических включений  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Шлак является оборотным и направляется, как правило, на переработку флотационным способом. Состав шлака зависит от состава исходного штейна и загружаемого флюса (рис. 6.2) [4].

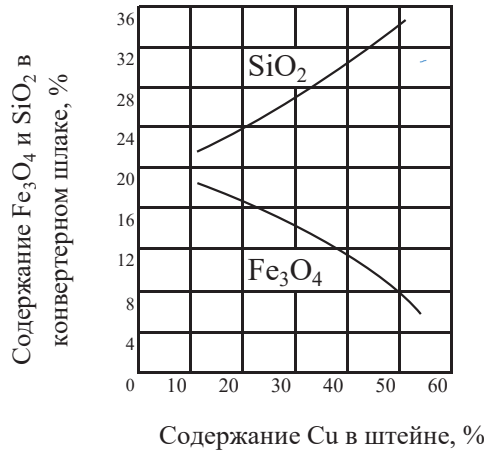


Рис. 6.2. Зависимость состава конвертерного шлака от состава исходного штейна (расчетное балансовое содержание)

Содержание фаялита составляет в шлаке 70–80 %, содержание магнетита в конвертерных шлаках зависит от содержания кремнезема (см. рис. 6.2 и данные ниже) [4].

**Зависимость содержания магнетита в шлаке от содержания  $\text{SiO}_2$**

$\text{SiO}_2$	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	27,0	25,6	24,2	22,8	21,3	19,9	18,5	17,1	15,7	14,3	12,8	11,4

При конвертировании образуются газы и пыль. Пылевынос составляет около 1 % от массы загружаемых материалов. Грубая пыль образуется за счет разбрызгивания расплава при продувке, кроме того, газами уносятся мелкие частицы кварцевого флюса и холодных добавок. Тонкие пыли образуются за счет возгонки цинка, свинца, мышьяка и др. Количество конвертерной пыли зависит от содержания меди в штейне: чем беднее штейн, тем дольше длится процесс конвертирования и больше образуется пыли. Содержание меди в конвертерной пыли — 20–25 %. Распределение меди по продуктам конвертирования приведено в табл. 6.2 [1].

Таблица 6.2

Распределение меди по продуктам конвертирования

Содержание меди в штейне, %	Распределение меди, %	
	Черновая медь	Шлак
30	94,0–94,5	5,44
40	97,0–97,3	2,62
50	97,0–98,0	1,72
60	98,0–98,8	1,02

Для проведения процесса конвертирования используют горизонтальные конвертеры (рис. 6.3), емкость конвертера оценивают по количеству находящегося в нем расплава 20–100 т.

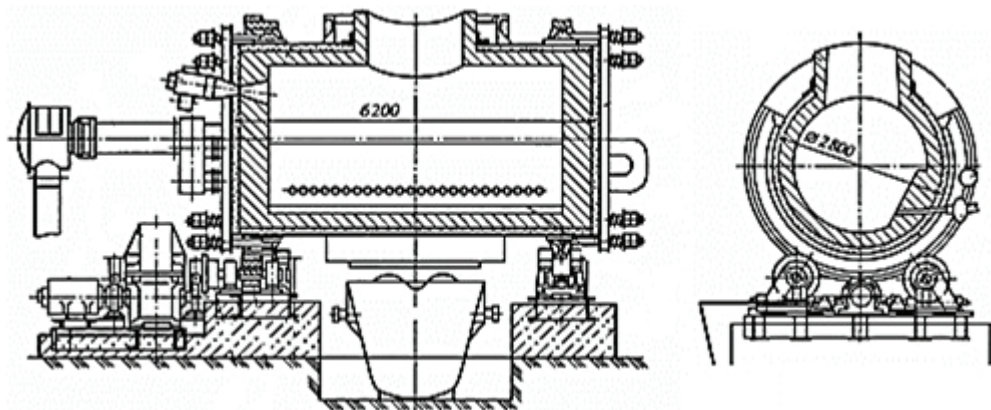


Рис. 6.3. Схема горизонтального конвертера

В зависимости объема, длина конвертеров составляет 2,3–4,3 м, диаметр — 4,5–10 м. Горловина конвертера расположена под углом 13–30 °С к вертикальной плоскости. Горловина может быть круглой, прямоугольной или овальной, по периметру горловины на кожухе крепится литая стальная рама — воротник высотой 550–900 мм. Дутье в конвертер подают через фурмы, расположенные с одной стороны корпуса, количество фурм — 41–52 шт. Над горловиной конвертера устанавливают напыльник для сбора и удаления технологических газов.

Футеровка конвертеров — хромомагнетитовые, магнетитохромитовые и периклазошпинелидные огнеупоры (табл. 6.3). Толщина

кладки — 300–500 мм, но в области фурменного пояса, где футеровка подвергается наиболее интенсивному разрушающему воздействию расплава, толщина футеровки составляет 540–800 мм. Срок службы огнеупорной футеровки составляет 3–6 мес.

Таблица 6.3

**Теплопроводность огнеупоров**

Наименование огнеупоров	Коэффициент $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·град), при рабочей температуре	Рабочая температура, °С
Магнезитовый	1,240	1647–1697
Хромомагnezит	2,400	1697
Хромитовый	1,966	1647–1697
Динас	2,110	1697
Диатомитовый	0,309	847

Производительность конвертеров определяется по расходу воздуха на единицу массы перерабатываемого штейна (табл. 6.4).

Таблица 6.4

**Характеристики горизонтальных конвертеров**

Показатель	Ед. изм	Значение	
Емкость по меди	т	40	80
Диаметр кожуха	м	3,65	3,95
Длина кожуха	м	6,1	9,2
Число фурм	шт	32	52
Площадь сечения фурм	см <sup>2</sup>	422	826
Средняя толщина футеровки	м	0,45	0,55
Пропускная способность по воздуху	м <sup>3</sup> /мин	300–400	600–700
Максимальная пропускная способность по воздуху	нм <sup>3</sup> /ч	36 000	48 000
Размеры горловины	м <sup>2</sup>	3	6
Скорость поворота бочки	об/мин	0,7	0,7
Время работы под дутьем	Доля от общего времени	0,70–0,80	

## 6.1. Расчет материального баланса конвертирования

### 6.1.1. Исходные данные для расчета

Расчет ведем на 100 кг горячего медного штейна, полученного при плавке в печи Ванюкова. Состав штейна приведен в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Состав медного штейна

Компонент	Формула	Содержание, %
Медь	Cu	49,00
Железо	Fe	23,91
Свинец	Pb	0,30
Цинк	Zn	0,50
Кислород	O	1,70
Сера	S	23,80
Прочие	—	0,79
ИТОГО		100,00

В качестве кварцевого флюса используем кварцевую руду (табл. 6.6).

Таблица 6.6

Состав кварцевой руды

Компонент	Формула	Содержание, %
Медь	Cu	0,30
Железо	Fe	4,10
Кремнезем	SiO <sub>2</sub>	69,30
Оксид кальция	CaO	2,22
Глинозем	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,50
Сера	S	0,21
Прочие	—	12,37
ИТОГО		100,00

Основные минералы кварцевой руды — Cu<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, CuFeS<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>.

В качестве холодных материалов используем медьсодержащие лом и шлак, полученный при огневом рафинировании черновой меди в соотношении 3:1 (табл. 6.7).

Таблица 6.7

**Состав холодных присадок, %**

Материал	Компоненты								
	Cu	Zn	Pb	Fe	O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Пр.	ИТОГО
Медный лом	66,00	1,00	1,10	14,00	0,10	—	—	6,80	89,00
Шлак огневого рафинирования	41,40	3,70	1,40	15,00	10,93	9,50	3,50	14,57	100

В ломе весь кислород входит в состав  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , все остальные компоненты находятся в металлическом виде.

Медь в рафинировочном шлаке на 25 % представлена металлической медью, остальная медь находится в виде  $\text{Cu}_2\text{O}$ ; 20 % цинка находится в металлическом виде, остальной цинк — в виде  $\text{ZnO}$ ; свинец входит в состав силиката  $2\text{PbO} \cdot \text{SiO}_2$ ; железо распределяется между магнетитом  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (55 %) и фалялитом  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ .

Рассчитываем рациональный состав всех исходных материалов по методике, рассмотренной в гл. 1. Расчет ведем на 100 кг каждого материала. Полученные результаты заносим в табл. 6.8—6.10.

Таблица 6.8

**Рациональный состав штейна**

Соединения	Элементы, кг							ИТО-ГО
	Cu	Fe	Pb	Zn	O <sub>2</sub>	S	Пр.	
$\text{Cu}_2\text{S}$	49,00	—	—	—	—	12,35	—	61,35
$\text{FeS}$	—	19,46	—	—	—	11,16	—	30,63
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	—	4,45	—	—	1,70	—	—	6,15
$\text{PbS}$	—	—	0,30	—	—	0,05	—	0,35
$\text{ZnS}$	—	—	—	0,5	—	0,24	—	0,74
Прочие	—	—	—	—	—	—	0,79	0,79
ВСЕГО	49,00	23,91	0,30	0,5	1,70	23,80	0,79	100,00
Содержание, %	49,00	23,91	0,30	0,5	1,70	23,80	0,79	100,00

Таблица 6.9

**Рациональный состав кварцевой руды, кг**

Соединения	Элементы								ИТОГО
	Cu	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
$\text{CuFeS}_2$	0,21	0,18	0,21	—	—	—	—	—	0,60
$\text{Cu}_2\text{O}$	0,09	—	—	—	—	—	0,01	—	0,10

Окончание табл. 6.9

Соединения	Элементы								ИТОГО
	Cu	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	3,92	—	—	—	—	0,75	—	4,67
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	55,74	—	—	—	—	55,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	—	—	—	13,56	11,5	—	—	—	25,06
CaCO <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	2,22	—	1,74	3,96
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	9,96	9,96
ВСЕГО	0,30	4,10	0,21	69,30	11,50	2,22	0,76	11,70	100,09

Таблица 6.10

## Рациональный состав медного лома, кг

Соединения	Элементы						ИТОГО
	Cu	Fe	Zn	Pb	O <sub>2</sub>	Прочие	
Cu <sub>мет</sub>	66,0	—	—	—	—	—	66,0
Fe <sub>мет</sub>	—	13,77	—	—	—	—	13,77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,23	—	—	0,10	—	0,33
Pb <sub>мет</sub>	—	—	—	1,10	—	—	1,10
Zn <sub>мет</sub>	—	—	12,0	—	—	—	12,0
Прочие	—	—	—	—	—	6,80	6,80
ВСЕГО	66,0	14,0	12,0	1,10	0,10	6,80	100,00

Таблица 6.11

## Рациональный состав медного рафинировочного шлака, кг

Соединения	Элементы									ИТОГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O	Пр.	
Cu <sub>мет</sub>	1,7	—	—	—	—	—	—	—	—	1,66
Cu <sub>2</sub> O	39,7	—	—	—	—	—	—	5,01	—	44,75
Zn	—	0,74	—	—	—	—	—	—	—	0,74
ZnO	—	2,96	—	—	—	—	—	0,72	—	3,68
2PbO·SiO <sub>2</sub>	—	—	1,4	—	—	0,20	—	0,11	—	1,71
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	8,25	—	—	—	3,15	—	11,40
2FeO·SiO <sub>2</sub>	—	—	—	6,75	—	3,63	—	1,94	—	12,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	3,5	—	—	3,50
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	5,67	—	—	—	5,67
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	14,58	14,58
ВСЕГО	41,4	3,70	1,40	15,00	0,00	9,50	3,50	10,93	14,58	100,00

По данным табл. 6.10 и 6.11 рассчитываем усредненный состав холодных присадок для заданного соотношения лом: шлак = 3 : 1. При этом соотношении доля ломов в общем количестве холодных присадок составит 75 %, доля рафинировочного шлака — 25 %. Определяем содержание отдельных компонентов в усредненном составе холодных присадок по формуле

$$C_i = 0,75C_{i\text{лом}} + 0,25C_{i\text{шлак}},$$

где  $C_{i\text{лом}}$  — содержание  $i$ -го элемента в ломе (см. табл. 6.10), %;

$C_{i\text{шлак}}$  — содержание  $i$ -го элемента в рафинировочном шлаке (см. табл. 6.11), %.

Металлическая медь входит в состав ломов и шлака, содержание меди в холодных присадках усредненного состава получится

$$0,75 \cdot 66 + 0,25 \cdot 1,7 = 49,9 \text{ \%}.$$

Медь в виде  $\text{Cu}_2\text{O}$  содержится только в рафинировочном шлаке, содержание  $\text{Cu}_2\text{O}$  в холодных присадках усредненного состава получится

$$0,25 \cdot 39,7 = 9,9 \text{ \%}.$$

Содержание остальных элементов рассчитываем аналогично вышеприведенному расчету и составляем табл. 6.12.

Таблица 6.12

Рациональный состав усредненных холодных присадок, кг

Соединения	Элементы								ИТОГО
	Cu	Zn	Pb	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O	Пр.	
Cu <sub>мет</sub>	49,91	—	—	—	—	—	—	—	49,91
Cu <sub>2</sub> O	9,94	—	—	—	—	—	1,25	—	11,19
Zn	—	9,19	—	—	—	—	—	—	9,19
ZnO	—	0,74	—	—	—	—	0,18	—	0,92
Pb <sub>мет</sub>	—	—	0,83	—	—	—	—	—	0,83
2PbO·SiO <sub>2</sub>	—	—	0,35	—	0,05	—	0,03	—	0,43
Fe <sub>мет</sub>	—	—	—	10,33	—	—	—	—	10,33
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	2,06	—	—	0,79	—	2,85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	0,17	—	—	0,08	—	0,25
2FeO·SiO <sub>2</sub>	—	—	—	1,69	0,91	—	0,48	—	3,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	0,88	—	—	0,88
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	1,42	—	—	—	1,42
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	8,72	8,72
ВСЕГО	59,85	9,93	1,18	14,25	2,38	0,88	2,81	8,72	100,00

### 6.1.2. Расчет материального баланса первого периода конвертирования

#### Расчет холодных присадок

По графику зависимости количества холодных присадок от состава штейна (см. рис. 6.1) определяем, что для штейна с содержанием меди 49 % доля холодных присадок составляет порядка 10 % от массы штейна. Таким образом, на 100 кг залитого в конвертер штейна необходимо 10 кг холодных присадок. С холодными присадками в процесс придет дополнительное количество железа, меди и других элементов, массу которые рассчитаем по данным табл. 6.12.

$$M_i = c_i^{\text{хол}} \cdot 10/100,$$

где  $M_i$  — масса  $i$ -го элемента в загружаемых холодных присадках, кг;  
 $c_i^{\text{хол}}$  — содержание  $i$ -го элемента в усредненных холодных присадках, % (см. табл. 6.12);

10 — масса холодных присадок, кг.

С 10 кг холодных присадок в процесс поступит меди

$$59,85 \cdot 10/100 = 5,99 \text{ кг.}$$

Массу остальных элементов рассчитываем аналогично приведенному выше. Общая масса штейна и холодных присадок составит 110 кг (табл. 6.13).

Таблица 6.13

Масса штейна и холодных присадок

Материал	Масса, кг	Компонент, кг								
		Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O	Пр.
Штейн	100,0	49,00	0,50	0,30	23,91	23,80	—	—	1,70	0,79
Холодные присадки	10,0	5,99	0,99	0,12	1,42	—	0,24	0,09	0,28	0,87
<b>ИТОГО</b>	<b>110,0</b>	<b>54,99</b>	<b>1,49</b>	<b>0,42</b>	<b>25,33</b>	<b>23,80</b>	<b>0,24</b>	<b>0,09</b>	<b>1,98</b>	<b>1,66</b>

Правильность определения количества холодных присадок установим после расчета теплового баланса первого периода конвертирования.



## Расчет массы флюсов и предварительный расчет шлака

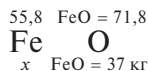
Флюсы необходимы для получения шлаков с нужными характеристиками, поэтому при расчете количества флюсов необходимо учесть следующие свойства конвертерных шлаков:

- железо в шлаке находится в виде фаялита  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$  и магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;
- содержание кремнезема  $\text{SiO}_2$  в конвертерных шлаках зависит от содержания меди в исходном штейне (см. рис. 6.2);
- содержание магнетита в конвертерном шлаке также зависит от содержания меди в исходном штейне и содержания  $\text{SiO}_2$  в получаемом шлаке (см. рис. 6.2, данные со с. 136), поэтому содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  для расчета можно принять по этим закономерностям;
- сумма главных составляющих шлака ( $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeO}$ ) зависит от состава кварцевого флюса и холодных материалов и составляет в среднем 90–95 %, но при использовании малокремнистых флюсов (60–70 %  $\text{SiO}_2$ ), сумма этих компонентов в шлаке снижается до 80–85 %. Чем выше содержание в кварцевом флюсе  $\text{SiO}_2$ , тем ближе будет состав шлака к чистому сплаву фаялита  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$  и магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Рассчитываем предварительный рациональный состав конвертерного шлака по сумме оксидов ( $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeO}$ ). По графику зависимости состава шлака от состава исходного штейна (см. рис. 6.2) находим, что при содержании в исходном штейне 49 % меди (см. табл. 6.1), содержание в конвертерном шлаке  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  составит порядка 7 % и  $\text{SiO}_2$  36 %. Поскольку в качестве флюса используем руду с относительно невысоким содержанием  $\text{SiO}_2$  – 69,3 % (табл. 6.4), то принимаем сумму ( $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeO}$ ) в шлаке равной 80 %, т. к. при использовании низкокачественных флюсов, в шлак перейдет из флюса большое количество балластных элементов (учитываются в графе «Прочие»). В этом случае сумма оксидов в шлаке составит

$$\text{SiO}_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeO} = 36 + 7 + 37 = 80 \, \%.$$

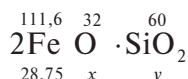
Поскольку рассчитываем рациональный состав шлака, постольку расчет ведем на 100 кг шлака. В этом случае масса железа в  $\text{FeO}$  составит



$$x = 55,8 \cdot 37 / 71,8 = 28,75 \text{ кг},$$

где 71,8 — атомная масса FeO, г/моль.

Примем, что весь FeO в шлаке связан с кремнеземом в фаялит  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ , и получим следующие массы кислорода и SiO<sub>2</sub> в фаялите на 100 кг шлака:

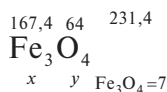


$$x = 28,75 \cdot 32 / 111,6 = 8,24 \text{ кг}; y = 28,75 \cdot 60 / 111,6 = 15,46 \text{ кг}.$$

При выбранном содержании SiO<sub>2</sub> 36 %, общая масса SiO<sub>2</sub> в 100 кг шлака составит 36 кг. Масса свободного SiO<sub>2</sub>

$$36 - 15,46 = 20,54 \text{ кг}.$$

Содержание Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> — 7 %, масса Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в 100 кг шлака — 7 кг, масса железа и кислорода в магнетите составит



$$x = 7 \cdot 167,4 / 231,4 = 5,06 \text{ кг}; y = 7 \cdot 64 / 231,4 = 1,94 \text{ кг}.$$

Медь, серу, примеси, кислород в остальных оксидах на данном этапе относим в прочие, массу их находим по разности между массой шлака 100 кг и массой SiO<sub>2</sub>; Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и FeO. Получаем предварительный теоретический рациональный состав конвертерного шлака (табл. 6.14).

Таблица 6.14

Предварительный рациональный состав конвертерного шлака, кг

Соединения	Компонент				ВСЕГО
	Fe	SiO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Прочие	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5,06	—	1,94	—	7,00
2FeO·SiO <sub>2</sub>	28,75	15,46	8,24	—	52,46
SiO <sub>2</sub>	—	20,54	—	—	20,54
Прочие	—	—	—	20,01	20,01
ИТОГО	33,81	36,00	10,18	20,01	100,00

Получаем содержание железа в шлаке 33,81 %;  $\text{SiO}_2$  36 %. Обозначим массу кварцевого флюса  $x$ , предварительную массу шлака  $y$ . В таком случае в получаемом шлаке масса железа должна быть  $0,338y$ , масса  $\text{SiO}_2$  —  $0,36y$ . Состав флюса приведен в табл. 6.4. Составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} \text{Fe} & 0,338y = 25,34 + 0,041x; \\ \text{SiO}_2 & 0,36y = 0,24 + 0,693x, \end{cases}$$

где 25,34 — масса железа, которая придет в шлак из штейна и холодных материалов (см. табл. 6.8), кг;

$0,041x$  — масса Fe, которая придет с флюсами (см. табл. 6.4), кг;

0,24 — масса  $\text{SiO}_2$ , которая придет в шлак из штейна и холодных присадок (см. табл. 6.8), кг;

$0,693x$  — масса  $\text{SiO}_2$ , которая придет в шлак с флюсами (см. табл. 6.4), кг.

Решив полученное уравнение, получаем  $x = 41,17$  кг,  $y = 79,91$  кг.

С кварцевым флюсом в процесс придет меди

$$41,17 \cdot 0,3/100 = 0,12 \text{ кг},$$

где 0,3 — содержание меди в кварцевом флюсе (см. табл. 6.4), %.

Массы остальных компонентов рассчитываем аналогично расчету выше, получаем табл. 6.15.

Таблица 6.15

Масса кварцевого флюса

Компонент	Формула	Масса, кг
Медь	Cu	0,12
Железо	Fe	1,69
Кремнезем	$\text{SiO}_2$	28,53
Оксид кальция	CaO	0,91
Глинозем	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,73
Сера	S	0,09
Прочие	-	5,09
ИТОГО		41,16

### Расчет пылевыноса и газов

При интенсивной продувке в конвертере образуются мельчайшие брызги расплава, которые переходят в грубую пыль и уносятся из кон-

вертера. Пылевынос составляет 1 % от массы загруженных материалов, такие грубые пыли являются оборотными материалами. Считаем, что в грубые пыли перейдет 1 % от всех загруженных в конвертер материалов — штейна, холодных присадок и флюсов.

Масса меди в штейне, холодных присадках и флюсе — 55,11 кг (см. табл. 6.13 и 6.14). В пыль перейдет 1 % от этой массы

$$55,11 \cdot 1/100 = 0,55 \text{ кг.}$$

Массу остальных элементов, перешедших в грубую пыль, рассчитываем аналогично расчету выше. Для наглядности расчета массы пыли на основе табл. 6.13 и 6.15 составляем табл. 6.16.

Таблица 6.16

Расчет массы конвертерной пыли

Материал	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O	Пр.	ИТО-ГО
Штейн	49,00	0,5	0,30	23,91	23,80	—	—	—	1,70	0,79	100,00
Холодные присадки	5,99	0,99	0,12	1,43	—	0,24	0,09	0,00	0,28	0,87	10,01
Флюс	0,12	—	—	1,69	0,09	28,53	4,73	0,91	—	5,09	41,16
ВСЕГО	55,11	1,49	0,42	27,03	23,89	28,77	4,82	0,91	1,98	6,75	151,17
<b>Пыль</b>	<b>0,55</b>	<b>0,01</b>	<b>0,004</b>	<b>0,27</b>	<b>0,24</b>	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,07</b>	<b>1,51</b>

После расчета количества компонентов, перешедших в пыль, определяем массу компонентов, которые перейдут в газовую фазу.

Летучие компоненты штейна и холодных материалов возгоняются в первом периоде конвертирования. Цинк переходит в возгоны на 60 %, свинец — на 25 % от их массы в исходных материалах. В возгонах цинк и свинец присутствуют в виде оксидов. Масса цинка, перешедшего в возгоны, составит

$$1,49 \cdot 0,6 = 0,9 \text{ кг,}$$

где 1,49 — общая масса цинка в штейне, холодных материалах и флюсе (см. табл. 6.16), кг.

Масса свинца, перешедшего в возгоны, составит

$$0,42 \cdot 0,25 = 0,1 \text{ кг,}$$

где 0,42 — масса свинца в штейне, холодных материалах и флюсе (см. табл. 6.16), кг.

В первом периоде в газ перейдет сера, связанная в штейне с железом. Масса серы в FeS составляет 11,16 кг (см. табл. 6.8); с учетом 1 % серы, перешедшей в пыль, в газовую фазу уйдет 99 % серы

$$11,16 \cdot 0,99 = 11,05 \text{ кг.}$$

Сера флюса связана в халькопирит, содержание серы во флюсе — 0,21 % — считаем, что вся сера останется в расплаве и пыли.

### Окончательный расчет конвертерного шлака

Все железо, пришедшее с штейном, холодными материалами и флюсом (см. табл. 6.16), распределится между шлаком и пылью. Масса железа в шлаке составит

$$27,02 - 0,27 = 26,75 \text{ кг,}$$

где 27,02 — масса железа, пришедшая со штейном, холодными материалами и флюсом (см. табл. 6.16), кг;

0,27 — масса железа, перешедшая в пыль (табл. 6.16), кг.

По данным табл. 6.2, при конвертировании штейнов с содержанием меди 50 %, в шлак перейдет 1,72 % всей меди. Для нашего штейна с содержанием 49 % меди примем это же значение. В этом случае распределение меди в первом периоде конвертирования можно представить в виде табл. 6.17.

Таблица 6.17

**Распределение меди в первом периоде конвертирования**

Материал	Масса меди, кг	Распределение меди, %
Штейн + холодные + флюс (табл. 6.17)	55,11	100
Шлак	0,95	1,72
Пыль	0,55	1,00
Белый матт	53,61	97,28

Медь находится в шлаке в виде  $\text{Cu}_2\text{S}$ , следовательно, с 0,95 кг меди в шлаке будет связано серы

$$0,95 \cdot 32 / (64 \cdot 2) = 0,24 \text{ кг,}$$

где 32 и 64 — атомные массы серы и меди, г/моль.

В конвертерный шлак перейдут оставшийся цинк, свинец и все оксиды холодных материалов и флюсов —  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др., массу которых в шлаке определим по разности

$$M_i^{\text{шлак}} = m_i^{\text{ш х ф}} - m_i^{\text{пыль}} - m_i^{\text{газ}},$$

где  $M_i^{\text{шлак}}$  — масса компонента в шлаке, кг;

$m_i^{\text{ш х ф}}$  — масса компонента в штейне, холодных присадках и флюсе, кг;

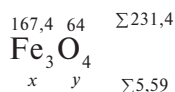
$m_i^{\text{пыль}}$ ;  $m_i^{\text{газ}}$  — масса компонента в пыли и газе, кг.

Рассчитаем содержание оксидов железа и кислорода в шлаке.

При расчете рационального состава шлака приняли, что содержание  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в шлаке 7%. Масса шлака по расчету составила 79,91 кг, в этом случае масса  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в шлаке составит

$$79,91 \cdot 7/100 = 5,59 \text{ кг.}$$

В магнетит будет связано железа и кислорода

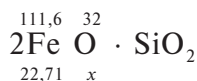


$$x = 4,05 \text{ кг}; y = 1,55 \text{ кг.}$$

На фаялит остается железа

$$26,75 \text{ (масса железа в шлаке)} - 4,05 \text{ (масса железа в } \text{Fe}_3\text{O}_4) = 22,7 \text{ кг.}$$

Масса кислорода в фаялите

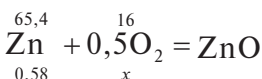


$$32 \cdot 22,71/111,6 = 6,51 \text{ кг.}$$

Свинец и цинк, переходящие в шлак, находятся в виде оксидов  $\text{ZnO}$  и  $\text{PbO}$ . В шлак перейдет цинка

$$1,49 - 0,01 - 0,90 = 0,58 \text{ кг.}$$

Масса кислорода на окисление 0,58 кг цинка по реакции составит

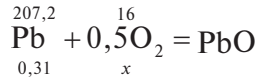


$$0,58 \cdot 16/65,4 = 0,14 \text{ кг.}$$

В шлак перейдет свинца

$$0,42 - 0,004 - 0,10 = 0,31 \text{ кг.}$$

Масса кислорода на окисление 0,31 кг свинца по реакции составит



$$0,31 \cdot 16/207,2 = 0,024 \text{ кг.}$$

Общая масса кислорода на все оксиды шлака составит

$$1,55 + 6,51 + 0,14 + 0,024 = 8,22 \text{ кг.}$$

По данным табл. 6.15, со штейном, холодными и флюсом в процесс придет 1,98 кг кислорода, уйдет в пыль 0,02 кг. Таким образом, на долю шлака остается только 1,96 кг кислорода. Остальное количество кислорода шлак получит из дутья. На основании всех расчетов составляем таблицу рационального состава практического шлака с учетом пылевыноса и кислорода дутья (табл. 6.18).

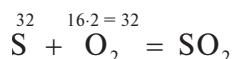
Таблица 6.18

Рациональный состав конвертерного шлака

Компо- ненты	Cu	Zn	Pb	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	O <sub>2</sub>	Пр.	ИТО- ГО, кг	Со- дер- жа- ние, %
Cu <sub>2</sub> S	0,95	—	—	—	0,24	—	—	—	—	—	1,19	1,54
ZnO	—	0,58	—	—	—	—	—	—	0,14	—	0,72	0,94
PbO	—	—	0,31	—	—	—	—	—	0,024	—	0,33	0,43
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	4,05	—	—	—	—	1,55	—	5,59	7,25
2FeO·SiO <sub>2</sub>	—	—	—	22,71	—	12,21	—	—	6,51	—	41,43	53,72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	4,77	—	—	—	4,77	6,19
SiO <sub>2</sub> свободн	—	—	—	—	—	16,27	—	—	—	—	16,27	21,10
CaO	—	—	—	—	—	—	—	0,90	—	—	0,90	1,17
Прочие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,91	5,91	7,66
Масса, кг	0,95	0,58	0,31	26,76	0,24	28,48	4,77	0,90	8,22	5,91	77,12	—
Содержа- ние, %	1,23	0,75	0,40	34,69	0,31	36,93	6,19	1,17	10,66	7,66	—	100,00

## Расчет количества дутья

Кислород в первом периоде конвертирования необходим для окисления серы, перешедшей в газ, окисления железа и других компонентов шлака. Цинк и свинец, перешедшие в газовую фазу, окислятся за счет подсосов воздуха на выходе из горловины конвертера. В качестве дутья используем воздух. Масса серы, перешедшей в газ, рассчитана при определении пылевыноса. Масса кислорода на окисление 11,05 кг серы по реакции



составит 11,05 кг.

Масса кислорода на окисление всех оксидов шлака была определена при расчете шлака и флюсов и составила 8,22 кг (см. табл. 6.18). Общая масса необходимого кислорода

$$11,05 + 8,22 = 19,27 \text{ кг.}$$

Со штейном и холодными материалами приходит 1,98 кг кислорода, в пыль уходит 0,02 кг (см. табл. 6.16). С учетом этого теоретически необходимая масса кислорода дутья составит

$$19,27 - (1,98 - 0,02) = 17,31 \text{ кг.}$$

Приняв степень усвоения кислорода ванной конвертера 93 %, находим практически необходимое количество кислорода

$$17,31 \cdot 100/93 = 18,62 \text{ кг.}$$

Массовая доля кислорода в воздухе — 23 % (или объемная доля — 21 %), массовая доля азота — 77 % (или объемная доля — 79 %), прочими газами пренебрегаем. Поскольку рассчитываем массу дутья, считаем ее по массовому содержанию. Через фурмы необходимо подать воздуха

$$18,62 \cdot 100/23 = 80,95 \text{ кг,}$$

в т. ч. азота

$$80,95 - 18,62 = 62,33 \text{ кг.}$$

Пересчитав полученную массу воздуха на объем при плотности воздуха 1,296 кг/м<sup>3</sup>, получаем объем дутья в первом периоде

$$80,95 \cdot 1,296 = 62,45 \text{ м}^3.$$



В результате подачи дутья изменится количество отходящих газов: к уже рассчитанным компонентам добавится кислород воздуха (кроме  $O_2$ , который перейдет в шлак) и весь азот. Масса цинка, перешедшего в возгоны, — 0,9 кг; масса свинца, перешедшего в возгоны, — 0,1 кг; в газовую фазу уйдет серы 11,05 кг. Все данные заносим в табл. 6.19 и рассчитываем состав газа.

Таблица 6.19

Состав отходящих газов

Показатель	Компонент					ИТОГО
	S	$O_2$	Zn	Pb	$N_2$	
Масса, кг	11,05	12,35	0,90	0,10	62,33	86,73
Содержание, мас. %	12,74	14,24	1,03	0,12	71,87	100,00

### Расчет количества белого матта

Белый матт, образующийся в конвертере после первого периода, содержит  $Cu_2S$ , металлическую медь и примеси. Сульфид меди переходит в белый матт из штейна и флюса, металлическая медь — из холодных присадок. Общая масса меди в белом матте — 53,61 кг (см. табл. 6.16), масса серы в белом матте рассчитывается как

$$23,89 - 0,24 - 11,05 - 0,24 = 12,36 \text{ кг},$$

где 23,89 — масса серы, пришедшая в процесс (см. табл. 6.15), кг;

0,24 — масса серы, перешедшая в пыль (см. табл. 6.15), кг;

11,05 — масса серы, ушедшая в газ (см. табл. 6.18), кг;

0,24 — масса серы в шлаке (см. табл. 6.17), кг.

Массу прочих в белом матте принимаем как массу прочих в штейне (0,79 кг — см. табл. 6.3) с учетом 1 % пылевыноса — 0,78 кг.

Общая масса белого матта

$$53,61 + 12,36 + 0,78 = 66,75 \text{ кг}.$$

Все расчеты технологического процесса первого периода сводим в таблицу материального баланса (табл. 6.20).

Невязка баланса в сотые доли процента считается допустимой и возникает за счет округления значений при расчетах.

### Расчет материального баланса второго периода конвертирования

В ходе первого периода в конвертере накапливается белый матт  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Во втором периоде процесс конвертирования ведут без остатков и без добавления холодных материалов, с подачей в конвертер только дутья. При продувке расплава,  $\text{Cu}_2\text{S}$  окисляется с образованием черновой меди, сера переходит в газ в виде  $\text{SO}_2$ . Кроме того, во втором периоде образуется небольшое количество так называемой изгари, состоящей из примесей, содержащихся в белом матте, остатков шлака от первого периода и окислившейся меди.

Благородные металлы переходят в черновую медь в металлическом виде; цинк, свинец, мышьяк, сурьма и другие примеси — в виде сульфидов.

Масса меди в белом матте — 53,61 кг (см. табл. 6.20). Извлечение в черновую медь из практического опыта, примем 99 %. В таком случае масса меди в черновой меди составит

$$53,61 \cdot 0,99 = 53,07 \text{ кг.}$$

При получении черновой меди марки МЧ1, содержание меди в черновой меди должно быть 99,4 % (см. табл. 6.1), тогда масса черновой меди составит

$$53,07 \cdot 100/99,4 = 53,39 \text{ кг.}$$

Содержание серы в черновой меди составляет 0,2 %, масса серы составит

$$53,39 \cdot 0,2/100 = 0,11 \text{ кг.}$$

Прочие в черновой меди находим по разности между массой черновой меди, серы и меди

$$53,39 - 53,07 - 0,11 = 0,21 \text{ кг.}$$

Масса серы в белом матте — 12,36 кг (см. табл. 6.20). Следовательно, во втором периоде нужно перевести в газовую фазу серы

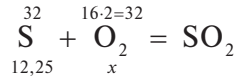
$$12,36 - 0,11 = 12,25 \text{ кг.}$$

Таблица 6.20

Материальный баланс 1 периода конвертирования

Материал	Масса, кг	Выход, %	Cu		Zn		Pb		Fe		S		SiO <sub>2</sub>		CaO		O2		Al2O3		Прочие	
			%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
ЗАГРУЖЕНО В 1 ПЕРИОДЕ																						
Штейн	100,00	43,08	49	49	0,5	0,5	0,3	0,3	23,91	23,91	23,8	23,8	—	—	—	—	1,7	1,7	—	—	0,79	0,79
Холодные материалы	10,00	4,31	59,85	5,99	9,93	0,99	1,18	0,12	14,25	1,42	—	—	2,38	0,24	—	—	2,81	0,28	0,88	0,09	8,74	0,87
Кварц	41,17	17,74	0,3	0,12	—	—	—	—	4,1	1,69	0,21	0,09	69,3	28,53	2,22	0,91	—	—	11,5	4,73	23,87	5,09
Дутье	80,95	34,87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	18,62	—	—	77	62,33
ИТОГО	232,12	—	—	55,11	—	1,49	—	0,42	—	27,02	—	23,89	—	28,77	—	0,91	—	20,60	—	4,82	—	69,08
ПОЛУЧЕНО																						
Шлак	77,12	33,22	1,23	0,95	0,75	0,58	0,4	0,31	34,69	26,75	0,31	0,24	36,93	28,48	1,17	0,9	10,66	8,22	6,19	4,77	7,66	5,91
Грубые пыли	1,51	0,65	36,45	0,55	0,99	0,01	0,28	0,004	17,88	0,27	15,8	0,24	19,03	0,29	0,6	0,01	1,31	0,02	3,19	0,05	4,47	0,07
Газ	86,73	37,37	—	—	1,03	0,9	0,12	0,104	—	—	12,74	11,05	—	—	—	—	14,24	12,35	—	—	71,86	62,33
Белый матт	66,75	28,76	80,31	53,61	—	—	—	—	—	—	18,52	12,36	—	—	—	—	—	—	—	—	1,17	0,78
ИТОГО	232,11	—	—	55,11	—	1,49	—	0,42	—	27,02	—	23,89	—	28,77	—	0,91	—	20,59	—	4,82	—	69,1

На окисление такого количества серы потребуется кислорода



$$x = 12,25 \text{ кг.}$$

При 93 % использования кислорода ванной конвертера, необходимое на практике количество кислорода составит

$$12,25 \cdot 100/93 = 13,18 \text{ кг.}$$

В качестве дутья используем воздух (массовая доля кислорода — 23 %, азота — 77 %), тогда общая масса воздуха составит

$$13,18 \cdot 100/23 = 57,28 \text{ кг.}$$

С таким количеством воздуха придет азота

$$57,28 - 13,18 = 44,11 \text{ кг.}$$

При плотности воздуха 1,295 кг/м<sup>3</sup>, объем воздуха составит 44,19 м<sup>3</sup>.

В газ перейдет сера, азот и кислород. В изгарь перейдут оставшиеся примеси и оставшаяся медь

$$53,61 \text{ (медь в белом матте)} - 53,07 \text{ (медь в черновой меди)} = 0,54 \text{ кг.}$$

Все результаты расчетов сводим в табл. 6.21 и на основе табл. 6.20 и 6.21 составляем табл. 6.22 — сводный материальный баланс процесса конвертирования.

Таблица 6.21

**Материальный баланс  
второго периода конвертирования**

Матери- ал	Мас- са, кг	Вы- ход, %	Cu		S		O <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		Прочие	
			%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
ЗАГРУЖЕНО												
Белый матт	66,75	53,82	80,31	53,61	18,52	12,36	—	—	—	—	1,17	0,78
Дутье (воздух)	57,28	46,18	—	—	—	—	23,00	13,18	77,00	44,11	—	—
ИТОГО	124,03	100,00	—	53,61	—	12,36	—	13,18	—	44,11	—	0,78

Окончание табл. 6.21

Матери- ал	Мас- са, кг	Вы- ход, %	Cu		S		O <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		Прочие	
			%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
ПОЛУЧЕНО												
Черно- вая медь	53,39	43,05	99,40	53,07	0,20	0,11	—	—	—	—	0,40	0,21
Газ	69,54	56,06	—	—	17,62	12,25	18,95	13,18	63,43	44,11	—	—
Изгарь	1,10	0,89	48,53	0,54	—	—	—	—	—	—	51,47	0,57
ИТОГО	124,03	100,00	—	53,61	—	12,36	—	13,18	—	44,11	—	0,78

При составлении сводного материального баланса нужно сложить массы компонентов дутья в приходной части балансов 1 и 2 периодов; массы компонентов газовой фазы 1 и 2 периодов в расходной части и рассчитать состав суммарных отходящих газов.

Белый матт не учитывается в общем балансе, т. к. является промежуточным продуктом.

## 6.2. Расчет теплового баланса первого периода конвертирования

Тепловой баланс первого периода рассчитываем на основе материального баланса (табл. 6.22), по методике, рассмотренной в гл. 3. Теплоемкость исходных материалов и конечных продуктов рассчитываем по методике, описанной в подгл. 3.4, через удельные теплоемкости отдельных компонентов и их содержание в исходных материалах и продуктах. Удельные теплоемкости отдельных веществ находим по табл. 3.5 и 3.8.

### 6.2.1. Приход тепла

В процессе конвертирования основные источники тепла — горячий штейн и экзотермические реакции. Штейн, заливаемый в конвертер, имеет температуру 1200 °С, холодные материалы, флюсы и дутье — температуру 20 °С. Теплоемкость воздуха составляет при этой температуре 1,30 кДж/(м<sup>3</sup>·град). Расчет теплоемкости штейна и флюса приведен в табл. 6.23.

Таблица 6.22

Полный материальный баланс конвертирования																					
Материал	Масса, кг	Cu		Zn		Pb		Fe		S		SiO <sub>2</sub>		CaO		O <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Прочие	
		%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
ЗАГРУЖЕНО																					
Штейн	100,0	49,00	49,00	0,50	0,50	0,30	0,30	23,91	23,91	23,80	23,80	—	—	—	—	1,70	1,70	—	—	0,79	0,79
Холодные материалы	10,0	59,85	5,99	9,93	0,99	1,18	0,12	14,25	1,43	—	—	2,38	0,24	—	—	2,81	0,28	0,88	0,09	8,74	0,87
Кварц	41,17	0,30	0,12	—	—	—	—	4,10	1,69	0,21	0,09	69,30	28,53	2,22	0,91	—	—	11,50	4,73	23,87	5,09
Дутье	138,23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23,00	31,79	—	—	77,00	106,44
ИТОГО	289,40	—	55,1	—	1,49	—	0,42	—	27,03	—	23,89	—	28,77	—	0,91	—	33,77	—	4,82	—	113,19
ПОЛУЧЕНО																					
Черновая медь	53,39	99,4	53,07	—	—	—	—	—	—	0,20	0,11	—	—	—	—	—	—	—	—	0,40	0,21
Шлак	77,12	1,23	0,95	0,75	0,58	0,4	0,31	34,69	26,75	0,31	0,24	36,93	28,48	1,17	0,90	10,66	8,22	6,19	4,77	7,66	5,91
Грубые пыли	1,51	36,45	0,55	0,99	0,01	0,28	0,004	17,88	0,27	15,8	0,24	19,03	0,29	0,60	0,01	1,31	0,02	3,19	0,05	4,47	0,07
Газ	156,27	—	—	0,57	0,90	0,07	0,104	—	—	14,91	23,30	—	—	—	—	16,34	25,53	—	—	68,11	106,44
Изгарь	1,10	48,53	0,54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	51,47	0,57
ИТОГО	289,39	—	55,11	—	1,49	—	0,42	—	27,02	—	23,89	—	28,77	—	0,91	—	33,77	—	4,82	—	113,2

Таблица 6.23

## Расчет теплоемкости флюсов и штейна

Соединение	Содержание в материале, %	$c_p$ , кДж/(кг·град)	Доля в общей теплоемкости, кДж/(кг·град)
Кварцевый флюс по основным компонентам (см. табл. 6.22)			
SiO <sub>2</sub>	69,30	1,134	$69,3 \cdot 1,134 / 100 = 0,786$
CaO	2,22	1,05	0,023
Кварцевый флюс по основным компонентам (см. табл. 6.22)			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,37	1,26	0,1559
ИТОГО теплоемкость флюса			0,965
Штейн (содержание компонентов — см. табл. 6.22)			
Cu <sub>2</sub> S	61,35	0,475	0,291
FeS	30,63	0,570	0,175
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	6,15	0,609	0,037
PbS	0,35	0,214	0,001
ZnS	0,74	0,517	0,004
ИТОГО теплоемкость штейна			0,508

Теплоемкость холодных материалов рассчитываем аналогично описанному выше, полученное значение — 0,73 кДж/(кг·град). Количество тепла, кДж, рассчитываем по формуле

$$Q = mc_p \cdot t,$$

где  $m$  — масса материала, кг;

$t$  — температура материала, °C;

$c_p$  — удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·град).

Тепло, вносимое штейном, составит

$$Q_{\text{шт}} = 100 \cdot 0,508 \cdot 1200 = 60\,960,00 \text{ кДж.}$$

Тепло, вносимое холодными материалами, составит

$$Q_{\text{хол}} = 10 \cdot 0,73 \cdot 20 = 146 \text{ кДж.}$$

Тепло, вносимое кварцевым флюсом, составит

$$Q_{\text{фл}} = 41,17 \cdot 0,965 \cdot 20 = 794,58 \text{ кДж.}$$

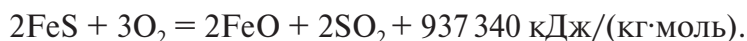
Тепло, вносимое дутьем (объем дутья  $62,45 \text{ м}^3$ ), составит

$$Q_{\text{возд}} = 62,45 \cdot 1,30 \cdot 20 = 1\,623,70 \text{ кДж},$$

где  $1,30$  — теплоемкость воздуха,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$ .

Определим тепло основных экзотермических реакций.

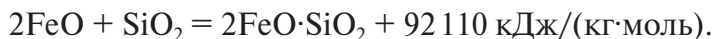
Реакция окисления сульфида железа



Масса  $\text{FeS}$  в штейне —  $30,63 \text{ кг}$  (см. табл. 6.8), в холодных и флюсе  $\text{FeS}$  — нет (см. табл. 6.9 и 6.12); в пыль перейдет  $1\%$   $\text{FeS}$ , в реакции вступит  $99\%$   $\text{FeS}$  —  $30,32 \text{ кг}$ . Молекулярная масса  $\text{FeS}$  —  $175,6 \text{ г/моль}$ . Тепловой эффект реакции

$$Q_{\text{FeS}} = mq/M = 30,32 \cdot 937\,340/175,6 = 161\,845,95 \text{ кДж}.$$

Реакция образования фаялита



При расчете шлака (см. табл. 6.18) определили, что в фаялит переходит  $22,71 \text{ кг}$  железа и  $6,51 \text{ кг}$  кислорода. Таким образом, общая масса  $\text{FeO}$ , вступающего в реакцию, составит  $29,22 \text{ кг}$ . Тепловой эффект реакции образования фаялита

$$Q_{\text{FeO}} = 29,22 \cdot 92\,110/143,6 = 18\,742,72 \text{ кДж}.$$

Суммарное тепло экзотермических реакций

$$Q_{\text{экз}} = 161\,845,95 + 18\,742,72 = 180\,588,67 \text{ кДж}.$$

### 6.2.2. Расход тепла

Шлак покидает конвертер с температурой  $1200^\circ\text{C}$ . Основные компоненты шлака определены при расчете его рационального состава (см. табл. 6.19) —  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  (содержание в шлаке  $53,72\%$ ),  $\text{SiO}_2$  своб ( $21,1\%$ );  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $6,19\%$ );  $\text{CaO}$  ( $1,17\%$ ). Удельные теплоемкости составляющих шлака находим по табл. 3.5 и рассчитываем теплоемкость шлака по основным составляющим

$$\begin{aligned} & (53,72 \cdot 1,008 + 21,1 \cdot 1,134 + 6,19 \cdot 1,26 + 1,17 \cdot 1,05) \cdot 0,01 = \\ & = 0,865 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град}). \end{aligned}$$



Тепло, уносимое шлаком, составит

$$Q_{\text{шл}} = mc_p \cdot t = 77,12 \cdot 0,865 \cdot 1200 = 80\,050,56 \text{ кДж.}$$

Теплоемкость пыли рассчитываем по теплоемкостям штейна, холодных присадок, флюсов и их доли в загрузке. Масса штейна — 100 кг, флюсов — 41,17 кг и холодных присадок — 10 кг (см. табл. 6.23). Общая масса этих материалов составит 151,17 кг.

Теплоемкость пыли составит

$$(100 \cdot 0,508 + 10 \cdot 0,73 + 41,17 \cdot 0,965)/151,17 = 0,65 \text{ кДж/(кг·град).}$$

Пыль уходит из конвертера с температурой около 800 °С, количество тепла, уносимое пылью, составит

$$Q_{\text{пыль}} = 1,51 \cdot 0,65 \cdot 800 = 785,20 \text{ кДж.}$$

Определяем теплоемкость белого матта. Масса белого матта — 66,75 кг. Масса меди в белом матте — 53,61 кг, масса серы — 12,36 кг (см. табл. 6.21). Вся сера связана с медью в  $\text{Cu}_2\text{S}$ , тогда масса  $\text{Cu}_2\text{S}$  составит

$$(64 \cdot 2 + 32) \cdot 12,36/32 = 61,8 \text{ кг,}$$

где 64 и 32 — атомные массы меди и серы, г/моль.

Содержание сульфида меди в белом матте

$$61,8 \cdot 100/66,75 = 92,58 \text{ \%}.$$

Содержание металлической меди в белом матте, следовательно, составит 7,42 %. Теплоемкости  $\text{Cu}_2\text{S}$  и  $\text{Cu}$  находим по табл. 3.5 и рассчитываем теплоемкость белого матта

$$(92,58 \cdot 0,475 + 7,42 \cdot 0,49) \cdot 0,01 = 0,476 \text{ кДж/(кг·град).}$$

Белый матт остается в конвертере, его температура составляет 1200 °С. Тепло белого матта составит

$$Q_{\text{бм}} = 66,75 \cdot 0,476 \cdot 1200 = 38\,127,60 \text{ кДж.}$$

**Тепло отходящих газов.** Пересчитаем массу отходящих газов в объем, а содержание компонентов — из массовых в объемные проценты по методике, рассмотренной в подгл. 3.5 (см. табл. 3.9). Состав газа приведен в табл. 6.20. Серу в газе представим в виде  $\text{SO}_2$ . При массо-

вой доле серы в газе 12,74 %, массовая доля  $\text{SO}_2$  составит 25,48 %. Соответственно этому снизится массовая доля кислорода

$$14,24 - 12,74 = 1,5 \%$$

Прочими составляющими пренебрегаем. Получаем объем газа и состав газа в объемных процентах, приведенный в табл. 6.25.

Таблица 6.25

Состав отходящего газа

Соединение	Содержание, мас. %	Молекулярная масса, г/моль	Объем, м <sup>3</sup>	Содержание, об. %
$\text{N}_2$	71,86	28	$71,86 \cdot 22,4/28 = 57,49$	$57,49 \cdot 100/67,46 = 85,22$
$\text{O}_2$	1,50	32	$1,5 \cdot 22,4/32 = 1,05$	$1,05 \cdot 100/67,46 = 1,56$
$\text{SO}_2$	25,48	64	$25,48 \cdot 22,4/64 = 8,92$	$8,92 \cdot 100/67,46 = 13,22$
Прочие	1,16	—	—	—
ИТОГО	100,00	—	67,46	100,00

Масса газа — 86,73 кг (см. табл. 6.21), объем отходящего газа составит

$$86,73 \cdot 67,46/100 = 58,51 \text{ м}^3.$$

Газ покидает конвертер с температурой 1200 °С, удельные теплоемкости составляющих газа при этой температуре находим по табл. 3.9 и рассчитываем теплоемкость отходящего газа

$$(85,22 \cdot 1,410 + 1,56 \cdot 1,151 + 13,22 \cdot 2,27) \cdot 0,01 = 1,51 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град}).$$

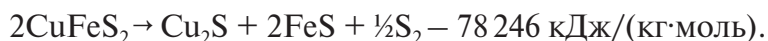
Тепло, уносимое отходящими газами, составит

$$Q_{\text{газ}} = 58,51 \cdot 1,51 \cdot 1200 = 106\,020,12 \text{ кДж}.$$

**Тепло на нагрев и расплавление холодных материалов.** Холодные материалы поступают с температурой 20 °С, температура расплава — 1200 °С. Тепло на нагрев и расплавление холодных материалов составит

$$Q_{\text{хол пр}} = 10 \cdot 0,73 \cdot (1200 - 20) = 8\,614,00 \text{ кДж}.$$

**Тепло эндотермических реакций.** В состав флюса входит халькопирит, который при высоких температурах разлагается по реакции



Содержание халькопирита в кварцевом флюсе — 0,6 % (см. табл. 6.10), масса  $\text{CuFeS}_2$  в 47,17 кг флюса составит 0,247 кг. Тепловой эффект реакции составит

$$Q_{\text{экз}} = 0,247 \cdot 78\,246/366,6 = 52,72 \text{ кДж.}$$

**Потери в окружающую среду.** Величина потерь в окружающую среду зависит главным образом от продолжительности процесса и объема конвертера. Тепло теряется через открытую горловину и кожух конвертера. Выберем конвертер КГ-80Ц объемом 80 т. Диаметр кожуха конвертера — 3,95 м, длина кожуха — 9,2 м, площадь горловины — 6 м<sup>2</sup> (см. табл. 6.5). Определяем площадь поверхности кожуха конвертера по формуле для расчета площади поверхности цилиндра

$$S = 2\pi R (h + R),$$

где  $R$  — радиус окружности основания, м;

$h$  — высота цилиндра.

Общая площадь поверхности кожуха составит

$$S_{\text{общ}} = 2 \cdot 3,14 \cdot (3,95/2) \cdot (9,2 + 3,95/2) = 138,6 \text{ м}^2.$$

Поскольку потери через горловину учитываем отдельно, вычитаем ее площадь из общей площади

$$S_{\text{кож}} = 138,6 - 6 = 132,6 \text{ м}^2.$$

Пропускная способность конвертера по воздуху составляет 600—700 м<sup>3</sup>/мин (см. табл. 6.5). Принимаем среднее значение 650 м<sup>3</sup>/мин и пересчитываем на часовую пропускную способность

$$650 \cdot 60 = 39\,000 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Продолжительность работы конвертера ведем в пересчете на 100 кг перерабатываемого штейна в каждом периоде рассчитываем по количеству подаваемого дутья с учетом коэффициента использования конвертера под дутьем. По табл. 6.5 для выбранного 80-тонного конвертера коэффициент работы под дутьем составляет 0,7—0,80, выбираем среднее значение 0,75.

Объем дутья в первом периоде составляет 62,45 м<sup>3</sup>, во втором — 44,19 м<sup>3</sup>. Продолжительность переработки 100 кг штейна в первом периоде составит

$$\tau_1 = 62,45/(39\,000 \cdot 0,75) = 0,0021 \text{ ч;}$$

во втором периоде —

$$\tau_2 = 44,19 / (39\,000 \cdot 0,75) = 0,0015 \text{ ч.}$$

Средняя толщина футеровки конвертера — 0,55 м (см. табл. 6.5).  
Материал футеровки — хромомагнетит. Теплопроводность хромомагнетита при рабочей температуре составляет  $\lambda = 2,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$  (см. табл. 6.5). Отношение толщины футеровки к  $\lambda$  составит

$$0,55 / 2,4 = 0,23.$$

Рабочая температура внутри конвертера составляет 1200–1250 °С. По графику (рис. 6.4 [5]) определяем температуру внешней поверхности кожуха и удельный поток тепла через стенку (пунктирная линия).

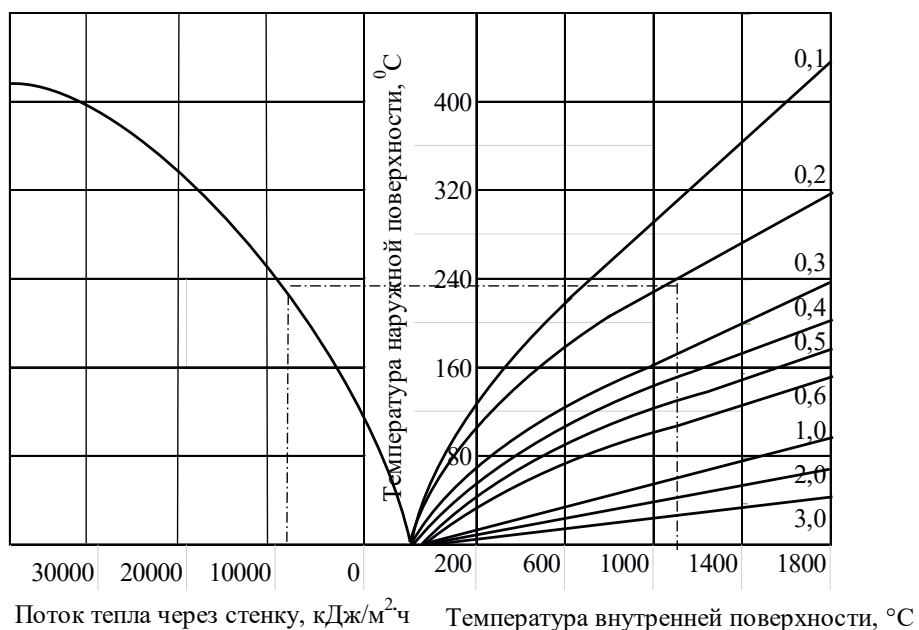


Рис. 6.4. График для определения потерь тепла через кладку

Удельный поток тепла составит 9800 кДж/(м²·ч). Потери тепла через кожух конвертера в первом периоде составят

$$Q^1_{\text{кож}} = q_k \cdot S_{\text{кож}} \cdot \tau_1,$$

где  $q_k$  — удельный тепловой поток, кДж/(м²·с);

$S_{\text{кож}}$  — площадь поверхности кожуха конвертера, м²;

$\tau_1$  — время переработки 100 кг штейна в первом периоде, ч.

$$Q^1_{\text{кож}} = 9800 \cdot 132,6 \cdot 0,0021 = 2728,91 \text{ кДж.}$$

**Потери тепла лучеиспусканием через горловину конвертера.** Коэффициент диафрагмирования для горловины площадью  $6 \text{ м}^2$  при толщине футеровки  $0,55 \text{ м}$  составит  $\phi = 0,87$  [4]. По рис. 6.5 [5] определяем удельные потери тепла через горловину (пунктирная линия).

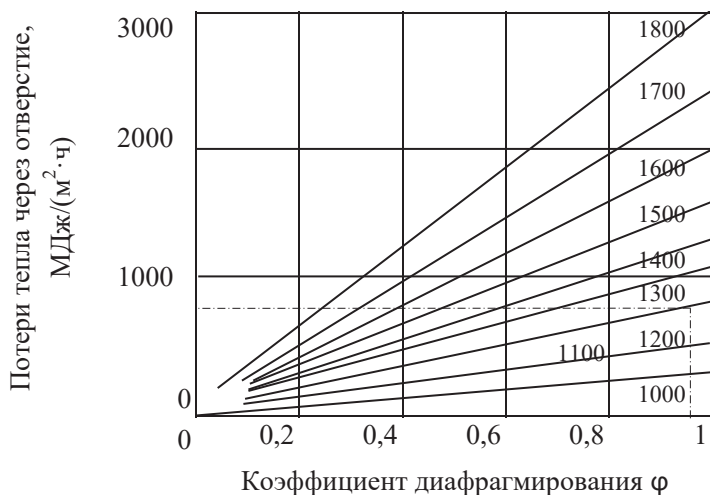


Рис. 6.5. График для определения потерь тепла через открытые отверстия в зависимости от рабочей температуры внутри агрегата

Удельные потери тепла составят  $790\,000 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Потери через горловину конвертера в первом периоде будут

$$Q^1_{\text{гор}} = q_{\text{г}} \cdot S_{\text{гор}} \cdot \tau_1,$$

$$Q^1_{\text{гор}} = 790\,000 \cdot 6 \cdot 0,0021 = 9954,00 \text{ кДж.}$$

Суммарные потери через кожух и горловину конвертера составят

$$2728,91 + 9954,00 = 12\,682,91 \text{ кДж.}$$

Все полученные значения прихода и расхода тепла заносим в табл. 6.26 и рассчитываем долю каждой статьи баланса в общем приходе и расходе тепла.

Невязка теплового баланса составила менее 1 %, что допустимо для технологических расчетов процесса. Но, с учетом недостатка тепла, при увеличении этого значения необходимо уменьшить массу хо-

лодных присадок. Основные потери тепла приходятся на тепло, уносимое технологическими газами и шлаком.

Таблица 6.26

**Тепловой баланс первого периода конвертирования**

Приход тепла			Расход тепла		
Статья баланса	кДж	%	Статья баланса	кДж	%
Штейн	60 960,00	24,96	Шлак	80 050,56	32,49
Холодные материалы	146,00	0,06	Грубые пыли	785,20	0,32
Кварц	794,58	0,33	Газ	106 020,12	43,04
Дутье	1 623,70	0,67	Белый матт	38 127,60	15,48
Экзотермические реакции	180 588,67	73,98	Эндотермические реакции	52,74	0,02
ИТОГО	244 112,95	100,00	Расплавление холодных присадок	8 614,00	3,49
			Потери через кладку и горловину	12 682,91	5,16
			ИТОГО	246 333,13	100,00
			Невязка баланса	-2 220,18	-0,91

### 6.3. Расчет теплового баланса второго периода конвертирования

Источниками тепла во втором процессе будут тепло белого матта, находящегося в конвертере, тепло дутья и тепло экзотермических реакций.

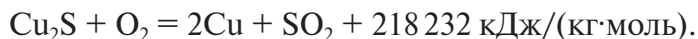
Тепло белого матта рассчитали при расчете теплового баланса первого периода и получили значение 38 127,60 кДж (см. табл. 6.26).

Во втором периоде в конвертер подают только воздух. Объем подаваемого воздуха ( $44,19 \text{ м}^3$ ) определили при расчете материального баланса второго периода. Воздух подается в конвертер с температурой  $20^\circ\text{C}$ , теплоемкость воздуха при такой температуре  $1,3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$ . Тепло, вносимое дутьем, составит

$$Q_{\text{возд}} = 44,19 \cdot 1,30 \cdot 20 = 1\,148,94 \text{ кДж.}$$

В состав белого матта входит медь и сера. Сера перейдет в газ и в небольшом количестве — в черновую медь в виде  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Масса серы,

перешедшая в черновую медь — 0,11 кг (см. табл. 6.22). Следовательно, останется в  $\text{Cu}_2\text{S}$  и вступит в реакции 12,25 кг серы (см. табл. 6.22). Суммарная реакция второго периода конвертирования будет



Определим массу  $\text{Cu}_2\text{S}$ , вступающего в эту реакцию через серу, входящую в его состав,

$$\begin{array}{cc} \text{Cu}_2\text{S} = 160 & 32 \\ \text{Cu}_2 & \text{S} \\ x & 12,25 \end{array}$$

$$x = 160 \cdot 12,25 / 32 = 61,25 \text{ кг}.$$

Тепловой эффект реакции составит

$$Q_{\text{Cu}_2\text{S}} = 61,25 \cdot 218\,232 / 160 = 83\,541,94 \text{ кДж}.$$

**Расход тепла.** Тепло экзотермических и эндотермических реакций учли при расчете суммарной реакции второго периода, но во втором периоде температура в конвертере начинает постепенно снижаться, поэтому после окончания второго периода черновую медь немедленно разливают.

Черновая медь покидает конвертер с температурой 1200 °С, теплоемкость черновой меди составляет 0,44 кДж/(кг·град). Тепло, уносимое черновой медью, будет

$$Q_{\text{чм}} = 53,39 \cdot 0,44 \cdot 1200 = 28\,189,92 \text{ кДж}.$$

Тепло, уносимое изгарью, составит

$$Q_{\text{изг}} = 1,10 \cdot 0,44 \cdot 1000 = 484,00 \text{ кДж}.$$

Массовое содержание серы в отходящих газах второго периода — 17,62 %, кислорода — 18,95 % (см. табл. 6.22). В пересчете содержания серы на содержание  $\text{SO}_2$  получаем 35,24 %. Таким образом, содержание свободного кислорода составит

$$18,95 - 17,62 = 1,33 \text{ \%}.$$

Пересчитываем содержание компонентов отходящих газов из массовых в объемные проценты (табл. 6.27) и определяем теплоемкость газов при температуре 1200 °С.

Таблица 6.27

**Массовое и объемное содержание компонентов  
отходящих газов**

Компонент	Содержание, мас. %	Объем, м <sup>3</sup>	Содержание, об. %
N <sub>2</sub>	63,43	50,75	79,28
O <sub>2</sub>	1,33	0,93	1,45
SO <sub>2</sub>	35,24	12,33	19,27
ИТОГО	100,00	64,01	100,00

Масса отходящих газов — 69,54 кг (см. табл. 6.22), объем отходящих газов составит

$$69,54 \cdot 64,01/100 = 44,51 \text{ м}^3.$$

Удельные теплоемкости составляющих газа находим по табл. 3.9 и рассчитываем теплоемкость отходящего газа

$$(79,28 \cdot 1,42 + 1,45 \cdot 1,151 + 19,27 \cdot 2,28) \cdot 0,01 = 1,58 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град}).$$

Газ покидает конвертер с температурой 1200 °С, тепло, уносимое отходящими газами, составит

$$Q_{\text{газ}} = 44,5 \cdot 1,58 \cdot 1200 = 84\,390,96 \text{ кДж}.$$

Потери тепла через кожух и горловину конвертера рассчитываем так же, как потери в первом периоде. Продолжительность продувки в первом периоде (на 100 кг исходного штейна)  $\tau_2 = 0,0015 \text{ ч}$ .

$$Q_{\text{кож}}^2 = 9800 \cdot 132,6 \cdot 0,0015 = 1\,949,22 \text{ кДж}.$$

$$Q_{\text{гор}}^2 = 790\,000 \cdot 6 \cdot 0,0015 = 7\,110,00 \text{ кДж}.$$

Суммарные потери тепла через кожух и горловину конвертера составят

$$1\,949,22 + 7\,110,00 = 9\,059,22 \text{ кДж}.$$

Составляем табл. 6.28 — тепловой баланс второго периода.

На основе табл. 6.26 и 6.28 составляем табл. 6.29 — сводный тепловой баланс процесса конвертирования. Белый матт является обратным продуктом; в таблице сводного баланса он не показан.



Таблица 6.28

**Тепловой баланс второго периода конвертирования**

Приход тепла			Расход тепла		
Статья баланса	кДж	%	Статья баланса	кДж	%
Белый матт	38 127,60	31,04	Черновая медь	28 189,92	23,08
Дутье (воздух)	1148,94	0,94	Отходящий газ	84 390,96	69,10
Экзотермические реакции	83 541,94	68,02	Изгарь	484	0,40
ИТОГО	122 818,48	100,00	Потери через кладку и горловину	9059,22	7,42
			ИТОГО	122 124,10	100
Невязка баланса				694,38	0,57

Таблица 6.29

**Сводный тепловой баланс процесса конвертирования**

Приход тепла			Расход тепла		
Статья баланса	кДж	%	Статья баланса	кДж	%
Штейн	60 960,00	18,54	Черновая медь	28 189,92	8,53
Холодные матери- алы	146,00	0,04	Шлак	80 050,56	24,23
Кварцевый флюс	794,58	0,24	Пыль	785,20	0,24
Дутье	2772,64	0,85	Газ	190 411,08	57,64
Экзотермические реакции	26 4130,61	80,33	Изгарь	484,00	0,15
ИТОГО	328 803,83	100,00	Эндотермические реакции	52,74	0,02
			Расплавление холод- ных присадок	8614,00	2,61
			Потери через кладку и горловину	21 742,13	6,58
			ИТОГО	330 329,63	100,00
Невязка баланса				−1525,8	−0,46

При составлении сводного баланса, в приходной части суммируем количество тепла, вносимого дутьем и в результате экзотермических реакций в первом и втором периоде,

$$Q_{\text{дутье}}^{\text{общ}} = 1\,623,70 + 1\,148,94 = 2\,772,64 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{экз}}^{\text{общ}} = 180\,588,67 + 83\,541,94 = 264\,130,61 \text{ кДж.}$$

В расходной части суммируем количество тепла, уносимого газами, а также теряемого через кладку и горловину конвертера в первом и втором периоде,

$$Q_{\text{газ}}^{\text{общ}} = 106\,020,12 + 84\,390,96 = 190\,411,08 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{клад}}^{\text{общ}} = 12\,682,91 + 9\,059,22 = 21\,742,13 \text{ кДж}.$$

### Контрольные вопросы

1. Назовите цель процесса конвертирования медных штейнов.
2. Какие флюсы используют при конвертировании?
3. С какой целью в конвертер добавляют холодные материалы?
4. Назовите основные статьи прихода и расхода тепла при конвертировании.
5. От чего зависит продолжительность первого и второго периодов конвертирования?

---

## 7. Огневое рафинирование черновой меди

---

**Ч**ерновая медь, полученная после конвертирования медных штейнов, содержит 97–99,5 % меди (см. табл. 6.3). Количество и номенклатура примесей зависят от состава медных концентратов и прочего исходного медьсодержащего сырья, поступающего на выплавку штейна. Содержание золота в черновой меди может достигать 150 г/т и более, серебра — более 2000 г/т. Примеси, даже в незначительном количестве, снижают механические свойства меди, поэтому черновую медь подвергают сперва огневому (окислительному) рафинированию для удаления неблагородных примесей (Zn, Fe, Pb, S, Ni, As, Sb и др.), а затем электролитическому рафинированию для окончательной очистки от примесей и выделения благородных металлов, селена и теллура в отдельный продукт (шлам). Медь-электролитный шлам далее перерабатывают с получением благородных металлов, селена, теллура и других металлов.

Черновая медь поступает на рафинировочные заводы в виде слитков массой около 1–1,5 т. Исключения составляют заводы полного цикла. В этом случае черновая медь ковшами транспортируется из отделения конвертирования на участок огневого рафинирования. Вместе с черновой медью на огневое рафинирование направляют чистый медный лом, анодный скрап, медные изложницы и другие медные оборотные материалы.

Огневое рафинирование — периодический процесс и состоит из пяти стадий: загрузки шихты; плавления; окисления; дразнения (восстановления); розлива анодов. Продолжительность стадий различна и зависит от состава черновой меди, количества загружаемых в печь отходов и ломов меди, емкости печи и производительности разливочного оборудования. В печи в разные периоды создается окислительная или восстановительная атмосфера (табл. 7.1).

Загрузка шихты производится через загрузочные окна в хорошо разогретую печь. Емкость печи по расплавленному металлу соответствует массе загружаемой в печь шихты.

Таблица 7.1

**Продолжительность операций процесса огневого рафинирования  
в стационарной печи емкостью 350 т**

Операция	Продолжительность, ч	Атмосфера в печи
Загрузка шихты	2,0–3,0	Слабоокислительная
Первое подплавление	2,5	Слабоокислительная
Первая догрузка	0,5–0,9	Слабоокислительная
Второе подплавление	2,5	Слабоокислительная
Вторая догрузка	0,5–0,6	Слабоокислительная
Плавление	3,5–4,0	Окислительная
Окисление	3,5–4,5	Окислительная
Восстановление	2,0–2,5	Восстановительная
Розлив	6,5–7	Восстановительная
ИТОГО	23,5–27,0	

Самая распространенная печь для огневого рафинирования — стационарная отражательная печь (рисунок ниже).

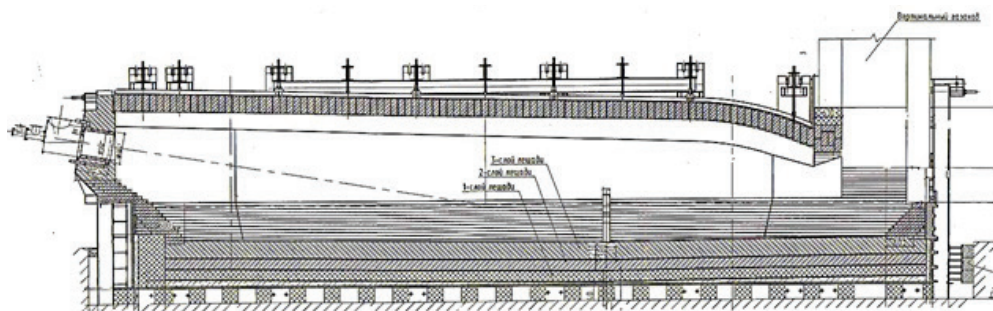
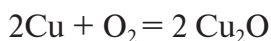


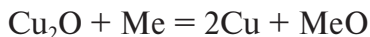
Схема отражательной печи для огневого рафинирования

Кладку печи (лещадь, откосы, стены и свод) выполняют из периклазохромитовых огнеупоров. Отапливается печь двумя горелками, установленными в торцевой части печи.

После расплавления меди проводят ее окисление сжатым воздухом, который подают через трубки непосредственно в расплавленный металл. Хотя примеси имеют большее сродство к кислороду, в первую очередь происходит окисление меди из-за ее высокого содержания в расплаве (97–99 %) по реакции



Затем окисляются примеси

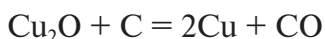
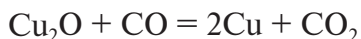
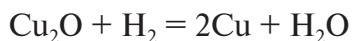


Порядок и скорость удаления примесей зависят от формы, в которой примеси находятся в черновой меди, и от их концентрации. Выделяют 3 группы примесей: элементы, растворимые в твердой меди (Al, Fe, Ni, Sn, Zn, Ag, Au, Pt, Cd, As, Sb); элементы, практически нерастворимые в меди и образующие с ней легкоплавкие эвтектики (Pb, Bi и др.); элементы, образующие с медью химические соединения (S, O<sub>2</sub>, P и др.).

При огневом рафинировании легко удаляются алюминий, железо, цинк, кобальт, которые окисляются и переходят в шлак. Сложнее удалить свинец и олово, а самыми сложноудаляемыми являются никель (его сродство к кислороду близко к сродству к кислороду меди), мышьяк и сурьма. Висмут при огневом рафинировании не удаляется из-за хорошей растворимости оксида висмута в металлической меди. Также остаются в анодной меди селен и теллур, только небольшое количество этих элементов улетучивается в виде селенидов и теллуридов меди. Серебро и золото, как наиболее электроположительные примеси, не окисляются и остаются в анодной меди.

Оксиды примесей поднимаются на поверхность расплава и образуют шлак. Съем шлака проводят очень тщательно.

В процессе окисления в расплаве образуется оксид меди Cu<sub>2</sub>O, который необходимо восстановить. После удаления шлака проводят восстановление Cu<sub>2</sub>O мазутом, древесиной или газом. Восстановление протекает по реакциям



Кроме образования Cu<sub>2</sub>O, в период окисления ванна расплава насыщается газами, в основном сернистым ангидридом. Для дегазации металла, после снятия рафинировочных шлаков, проводят дразнение — в печи создают восстановительную атмосферу, в расплав погружают бревна. В условиях высоких температур и при отсутствии кислорода в атмосфере печи, древесина не горит, а подвергается су-

хой перегонке. Продукты сухой перегонки — пары воды и СО — вызывают бурное перемешивание ванны, что способствует удалению газов из металла и повышает плотность анодной меди.

Разливку меди в аноды начинают сразу после окончания стадии восстановления, при разливе в печи сохраняется восстановительная атмосфера.

Получают следующие марки анодной меди: АН-1; АН-2; АН-3 с содержанием (Cu + Au + Ag) 99,0–99,5 % и выше. В анодной меди остаются примеси, %: 0,13–0,17 Pb; до 0,002 Fe; 0,2–0,15 O<sub>2</sub>; 0,03–0,1 Sb; 0,05–0,45 Ni; 0,003–0,03 Bi и др. Готовые аноды отправляют в цех электролиза меди на электролитическое рафинирование — завершающую операцию получения меди.

## 7.1. Расчет материального баланса по основным компонентам

### 7.1.1. Расчет состава шихты

На огневое рафинирование поступает черновая медь с медеплавильных заводов, анодные остатки (скрап) из цеха электролиза меди, медьсодержащий лом, отходы меди, оборотные продукты и т. д. Состав исходных материалов по основным компонентам приведен в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Состав исходных материалов

Материал	Содержание, %					
	Cu	Ni	Pb	Sb	As	Пр.
Черновая медь 1	99,25	0,01	0,08	0,09	0,06	0,51
Черновая медь 2	99,38	0,02	0,06	0,04	0,05	0,45
Черновая медь 3	97,63	0,60	0,10	0,30	0,20	1,17
Лома	94,33	0,75	0,50	0,60	0,90	2,92
Анодные остатки	99,50	0,12	0,04	0,04	0,05	0,25

Расчет ведем на одну загрузку стационарной анодной печи — 350 т. Доля исходных материалов в шихте представлена в табл. 7.3.

Таблица 7.3

## Доля исходных материалов в шихте

Вид сырья	Материал	Доля в загрузке, %
Первичное сырье	Черновая медь 1	23,0
Первичное сырье	Черновая медь 2	44,0
Первичное сырье	Черновая медь 3	20,0
Вторичное сырье	Лома	5,0
Оборотные материалы	Анодные остатки	8,0
ИТОГО		100,0

По данным табл. 7.2 и 7.3 рассчитываем химический состав шихты на одну плавку 350 т по методике, рассмотренной в гл. 1.

Масса черновой меди 1 в общей массе шихты составит

$$m_1 = 350 \cdot 23/100 = 80,5 \text{ т},$$

где 350 — масса шихты на одну загрузку, т;

23 — доля черновой меди 1 в шихте (см. табл. 7.3), кг.

С этим количеством черновой меди придет меди

$$m_1^{\text{Cu}} = 80,5 \cdot 99,25/100 = 79,896 \text{ т},$$

где 99,25 — содержание меди в черновой меди 1 (см. табл. 7.2), %.

С данным количеством черновой меди 1 придет никеля, свинца, сурьмы и мышьяка

$$m_1^{\text{Ni}} = 80,5 \cdot 0,01/100 = 0,008 \text{ т},$$

где 0,01 — содержание никеля в черновой меди 1, % (см. табл. 7.2);

$$m_1^{\text{Pb}} = 80,5 \cdot 0,08/100 = 0,064 \text{ т},$$

где 0,08 — содержание свинца в черновой меди 1, % (см. табл. 7.2);

$$m_1^{\text{Sb}} = 80,5 \cdot 0,09/100 = 0,072 \text{ т},$$

где 0,09 — содержание сурьмы в черновой меди 1, % (см. табл. 7.2);

$$m_1^{\text{As}} = 80,5 \cdot 0,06/100 = 0,048 \text{ т},$$

где 0,06 — содержание мышьяка в черновой меди 1, % (см. табл. 7.2).

Массы остальных компонентов шихты рассчитываем аналогично расчету выше и определяем содержание Cu, Ni, Pb, Sb, As и прочих в шихте, по методике, рассмотренной в гл. 1.

Общая масса меди, поступившая на плавку в шихте,

$$m_{\Sigma}^{\text{Cu}} = m_1^{\text{Cu}} + m_2^{\text{Cu}} + m_3^{\text{Cu}} + m_{\text{л}}^{\text{Cu}} + m_{\text{ан.ос}}^{\text{Cu}},$$

где  $m_1^{\text{Cu}}$  — масса меди, пришедшая с черновой медью 1;

$m_2^{\text{Cu}}$  — масса меди, пришедшая с черновой медью 2;

$m_3^{\text{Cu}}$  — масса меди, пришедшая с черновой медью 3;

$m_{\text{л}}^{\text{Cu}}$  — масса меди, пришедшая с ломami;

$m_{\text{ан.ос}}^{\text{Cu}}$  — масса меди, пришедшая с анодными остатками.

$$m_{\Sigma}^{\text{Cu}} = 79,896 + 153,045 + 68,341 + 16,508 + 27,86 = 345,650 \text{ т.}$$

Содержание меди в шихте

$$C_{\text{ш}}^{\text{Cu}} = m_{\Sigma}^{\text{Cu}} \cdot 100 / m_{\text{ш}} = 345,650 \cdot 100 / 350,0 = 98,757 \%,$$

где 350,0 — общая масса шихты, т.

Массу остальных компонентов в шихте и их содержание в шихте рассчитываем аналогично вышеприведенному расчету. Все полученные данные заносим в табл. 7.4.

### 7.1.2. Расчет массы и состава анодной меди

Перед началом расчета принимаем распределение компонентов по продуктам плавки согласно практическим данным (табл. 7.5).

Таблица 7.5

Распределение компонентов по продуктам плавки, %

Компонент	Аноды	Шлак	Пыль и газ	ИТОГО
Cu	99,43	0,52	0,05	100,00
Ni	80,00	19,89	0,11	100,00
Pb	20,00	70,00	10,00	100,00
As	70,00	5,00	25,00	100,00
Sb	65,5)	33,10	1,40	100,00
Прочие	25,27	63,63	11,10	100,00



Таблица 7.4

Состав шихты на плавку (350 т)

Материал	Доля в загрузке, %	М,	Cu		Ni		Pb		Sb		As		Прочие	
		т	%	т	%	т	%	т	%	т	%	т	%	т
Черновая медь 1	23,00	80,50	99,25	79,896	0,01	0,008	0,08	0,064	0,090	0,072	0,060	0,048	0,51	0,411
Черновая медь 2	44,00	154,0	99,38	153,045	0,02	0,031	0,06	0,092	0,040	0,062	0,050	0,077	0,45	0,693
Черновая медь 3	20,00	70,0	97,63	68,341	0,60	0,420	0,10	0,070	0,300	0,210	0,200	0,140	1,17	0,819
Лом	5,00	17,5	94,33	16,508	0,75	0,131	0,50	0,089	0,600	0,105	0,900	0,157	2,92	0,511
Анодные остатки	8,00	28,0	99,50	27,860	0,12	0,034	0,04	0,011	0,041	0,011	0,052	0,015	0,24	0,069
ИТОГО	100,00	350,0	98,757	345,650	0,18	0,624	0,093	0,326	0,132	0,461	0,125	0,437	0,71	2,503

Рассчитываем массу элементов, перешедших в анодную медь, т,

$$m_i^{\text{ам}} = D_i^{\text{ам}} \cdot m_i^{\text{шихта}} / 100,$$

где  $D_i^{\text{ам}}$  — доля элемента, переходящая в анодную медь (см. табл. 7.5), %;  
 $m_i^{\text{шихта}}$  — масса элемента в шихте (см. табл. 7.4), т.

Массы элементов в анодной меди

$$m_{\text{Cu}}^{\text{ам}} = 345,65 \cdot 99,43 / 100 = 343,68 \text{ т};$$

$$m_{\text{Ni}}^{\text{ам}} = 0,624 \cdot 80 / 100 = 0,499 \text{ т};$$

$$m_{\text{Pb}}^{\text{ам}} = 0,326 \cdot 20 / 100 = 0,065 \text{ т};$$

$$m_{\text{As}}^{\text{ам}} = 0,437 \cdot 70 / 100 = 0,306 \text{ т};$$

$$m_{\text{Sb}}^{\text{ам}} = 0,461 \cdot 65,5 / 100 = 0,302 \text{ т};$$

$$m_{\text{Пр}}^{\text{ам}} = 2,503 \cdot 25,27 / 100 = 0,632 \text{ т}.$$

Общая масса анодной меди без кислорода составит

$$343,68 + 0,499 + 0,065 + 0,306 + 0,302 + 0,632 = 345,484 \text{ т}.$$

Полученные данные сводим в табл. 7.6.

Таблица 7.6

**Предварительная масса и состав анодной меди**

Показатель	Компонент						
	Cu	Ni	Pb	Sb	As	Пр.	ИТОГО
Масса, т	343,680	0,499	0,065	0,302	0,306	0,632	345,484
Содержание, %	99,478	0,144	0,019	0,087	0,089	0,183	100,000

По данным практики содержание кислорода в анодной меди составляет 0,1–0,15 %. Масса кислорода в анодной меди составит

$$345,484 \cdot 0,15 / 100 = 0,518 \text{ т}.$$

Получаем новую массу анодной меди с участием кислорода и рассчитываем ее состав (табл. 7.7).

Таблица 7.7

**Масса и состав анодной меди**

Показатель	Компонент							
	Cu	Ni	Pb	Sb	As	Пр.	O <sub>2</sub>	ИТОГО
Масса, т	343,680	0,499	0,065	0,302	0,306	0,632	0,518	346,002
Содержание, %	99,329	0,144	0,019	0,087	0,088	0,183	0,150	100,00

При огневом рафинировании выход годных анодов составляет 97–99 % от общей массы анодов, доля бракованных анодов — 1–3 %. Брак получают при разливке из-за отклонения по массе выше допустимого, некачественной поверхности анодов и др. Такие бракованные аноды возвращают на следующую анодную плавку. Химический состав бракованных и годных анодов одинаковый. Принимаем выход бракованных анодов 2 % от общей массы анодной меди, тогда масса бракованных анодов составит

$$346,002 \cdot 2/100 = 6,920 \text{ т.}$$

Масса годных анодов

$$346,002 - 6,920 = 339,082 \text{ т.}$$

**7.1.3. Расчет массы и состава пыли**

Пыль при огневом рафинировании образуется за счет мельчайших брызг расплава, которые появляются над поверхностью ванны при подаче в расплав воздуха и восстановителя. Эти мелкие капли уносятся из печи потоком отходящих газов, кроме того, часть примесей при рафинировании возгоняется и уносится из печи в виде тонких пылей (возгонов). Металлы, перешедшие в пыль, находятся в пыли в виде оксидов. Рассчитываем массу элементов, перешедших в пыль, и массу кислорода на их окисление, т,

$$m_i^{\text{п}} = D_i^{\text{п}} \cdot m_i^{\text{шихта}}/100,$$

где  $D_i^{\text{п}}$  — доля элемента, переходящая в пыль (см. табл. 7.5), %;

$m_i^{\text{шихта}}$  — масса элемента в шихте (см. табл. 7.4), т.

Масса меди, перешедшей в пыль, составит

$$m_{\text{Cu}}^{\text{п}} = 0,05 \cdot 345,65/100 = 0,173 \text{ т.}$$

Масса кислорода на окисление такого количества меди определяется по реакции



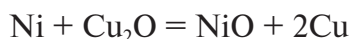
$$0,173 \cdot (16 \cdot 2 \cdot 0,5)/(64 \cdot 2) = 0,022 \text{ т,}$$

где 16 и 64 — атомные массы кислорода и меди, г/моль.

Остальные компоненты пыли рассчитываем аналогично выше-приведенному расчету; примеси в пыли окисляются за счет взаимодействия с оксидами меди.

Масса никеля в пыли составит

$$m_{\text{Ni}}^{\text{п}} = 0,11 \cdot 0,624/100 = 0,0007 \text{ т;}$$



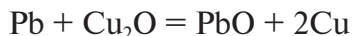
Масса кислорода в оксиде никеля составит

$$0,0007 \cdot 16/58,7 = 0,0002 \text{ т,}$$

где 16 и 58,7 — атомные массы кислорода и никеля, г/моль.

Масса свинца в пыли составит

$$m_{\text{Pb}}^{\text{п}} = 10 \cdot 0,326/100 = 0,033 \text{ т;}$$



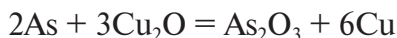
Масса кислорода в оксиде свинца составит

$$0,033 \cdot 16/207 = 0,003 \text{ т,}$$

где 16 и 207 — атомные массы кислорода и свинца, г/моль.

Масса мышьяка в пыли составит

$$m_{\text{As}}^{\text{п}} = 25 \cdot 0,437/100 = 0,109 \text{ т;}$$



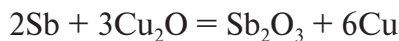
Масса кислорода в трехокиси мышьяка составит

$$0,109 \cdot (3 \cdot 16)/(2 \cdot 75) = 0,035 \text{ т,}$$

где 16 и 75 — атомные массы кислорода и мышьяка, г/моль.

Масса сурьмы в пыли составит

$$m_{\text{Sb}}^{\text{п}} = 1,4 \cdot 0,461/100 = 0,006 \text{ т};$$



Масса кислорода в трехокиси сурьмы составит

$$0,006 \cdot (3 \cdot 16)/(2 \cdot 121,8) = 0,001 \text{ т},$$

где 16 и 121,8 — атомные массы кислорода и сурьмы, г/моль.

Масса прочих в пыли составит

$$m_{\text{пр}}^{\text{п}} = 11,1 \cdot 2,503/100 = 0,278 \text{ т}.$$

Общая масса кислорода на все оксиды пыли составит

$$0,022 + 0,0002 + 0,003 + 0,035 + 0,001 = 0,061 \text{ т}.$$

Полученные данные сводим в табл. 7.8 и рассчитываем состав пыли.

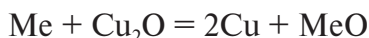
Таблица 7.8

Масса и состав пыли

Показатель	Компонент							
	Cu	Ni	Pb	Sb	As	Пр.	O <sub>2</sub>	ИТОГО
Масса, т	0,1730	0,0007	0,0330	0,0060	0,109	0,2780	0,0610	0,6607
Содержание, %	26,177	0,104	4,930	0,977	16,561	42,077	9,174	100,00

#### 7.1.4. Расчет массы и состава шлака

Окисление примесей при огневом рафинировании может происходить как за счет их взаимодействия с оксидом меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ , так и за счет их непосредственного окисления кислородом вдуваемого воздуха, но, поскольку концентрация примесей очень мала, доля прямого окисления минимальна и окисление идет по реакциям с  $\text{Cu}_2\text{O}$



Чтобы шлак поднялся на поверхность анодной меди, он должен иметь плотность, меньшую, чем плотность меди. Для образования легких силикатов, в печь вводят чистый кварцевый флюс. Рассчитываем массу элементов, перешедших в шлак из анодной меди, т, по формуле

$$m_i^{\text{шл}} = D_i^{\text{шл}} \cdot m_i^{\text{шихта}} / 100,$$

где  $D_i^{\text{шл}}$  — доля элемента, переходящая в шлак (см. табл. 7.5), %;

$m_i^{\text{шихта}}$  — масса элемента в шихте (см. табл. 7.4), т.

Масса меди в шлаке составит

$$m_{\text{Cu}}^{\text{шл}} = 0,52 \cdot 345,65 / 100 = 1,797 \text{ т.}$$

В шлаке медь находится как в металлическом виде, за счет механического уноса со шлаком, так и в виде оксида, в соотношении 40:60. Принимая это соотношение, рассчитываем массу металлической меди в шлаке

$$1,797 \cdot 0,4 = 0,719 \text{ т.}$$

Масса меди в виде  $\text{Cu}_2\text{O}$  будет

$$1,797 - 0,719 = 1,078 \text{ т.}$$

Для окисления 1,078 т меди потребуется кислорода



$$1,078 \cdot (16 \cdot 2 \cdot 0,5) / (64 \cdot 2) = 0,135 \text{ т,}$$

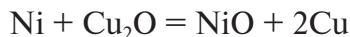
где 16 и 64 — атомные массы кислорода и меди соответственно, г/моль.

Общая масса  $\text{Cu}_2\text{O}$  в шлаке составит

$$1,078 + 0,135 = 1,213 \text{ т.}$$

Масса никеля, перешедшего в шлак, составит

$$m_{\text{Ni}}^{\text{шл}} = 20 \cdot 0,624 / 100 = 0,125 \text{ т,}$$



Масса кислорода в оксиде никеля составит

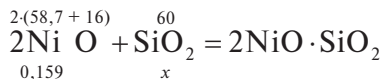
$$16 \cdot 0,125 / 58,7 = 0,034 \text{ т,}$$

где 16 и 58,7 — атомные массы кислорода и никеля соответственно, г/моль.

Общая масса оксида никеля в шлаке составит

$$0,125 + 0,034 = 0,159 \text{ т.}$$

Для перевода оксида никеля в силикат необходимо добавить кремнезема

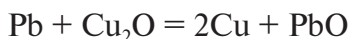


$$x = 0,159 \cdot 60 / (2 \cdot (58,7 + 16)) = 0,063 \text{ т},$$

где 16; 58,7; 60 — атомные массы кислорода, никеля и оксида кремния соответственно, г/моль.

Масса свинца, перешедшего в шлак, составит

$$m^{\text{шл}}_{\text{Pb}} = 70 \cdot 0,326 / 100 = 0,228 \text{ т},$$



Масса кислорода в оксиде свинца составит

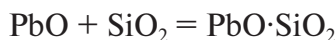
$$0,228 \cdot 16 / 207 = 0,018 \text{ т},$$

где 16 и 207 — атомные массы кислорода и свинца соответственно, г/моль.

Общая масса оксида свинца в шлаке составит

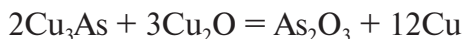
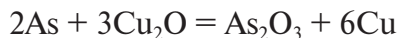
$$0,228 + 0,018 = 0,246 \text{ т}.$$

Для перевода свинца в силикат необходимо добавить кремнезема



$$0,246 \cdot 60 / (207 + 16) = 0,066 \text{ т}.$$

Окисление мышьяка при рафинировании меди идет по реакциям



Образующийся  $\text{As}_2\text{O}_3$  переходит в газовую фазу в период расплавления, улетучивание  $\text{As}_2\text{O}_3$  прекращается после расплавления меди. Это указывает на образование в шлаке арсенидов  $\text{Cu}_2\text{O} \cdot \text{As}_2\text{O}_3$ , которые при окислительной атмосфере печи способны переходить в арсенаты  $\text{Cu}_2\text{O} \cdot \text{As}_2\text{O}_5$ .

Масса мышьяка, перешедшего в шлак, составит

$$m^{\text{шл}}_{\text{As}} = 5 \cdot 0,437 / 100 = 0,022 \text{ т}.$$

Масса кислорода на окисление As в шлаке до  $\text{As}_2\text{O}_5$  составит



$$0,022 \cdot (16 \cdot 5) / (75 \cdot 2) = 0,012 \text{ т},$$

где 16 и 75 — атомные массы кислорода и мышьяка соответственно, г/моль.

Сурьма ведет себя подобно мышьяку и находится в шлаке в виде антимоната  $\text{Cu}_2\text{O} \cdot \text{Sb}_2\text{O}_3$ . Масса сурьмы, перешедшей в шлак, составит

$$m_{\text{Sb}}^{\text{шл}} = 33,1 \cdot 0,461 / 100 = 0,152 \text{ т}.$$

Масса кислорода на окисление Sb в шлаке до  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  составит

$$0,152 \cdot 16 \cdot 3 / (121,8 \cdot 2) = 0,03 \text{ т},$$

где 16 и 121,8 — атомные массы кислорода и сурьмы соответственно, г/моль.

Масса прочих, перешедших в шлак, составит

$$m_{\text{пр}}^{\text{шл}} = 2,503 \cdot 63,63 / 100 = 1,592 \text{ т}.$$

В шлак переходит железо от окисления стальных трубок, через которые в печь подают воздух. По данным практики расход стальных трубок составляет 0,1–0,15 кг на 1 тонну анодной меди. При массе анодной меди 345,485 т, масса железа, перешедшего в шлак, составит

$$345,485 \cdot 0,1 = 34,55 \text{ кг, или } 0,0345 \text{ т}.$$

Железо окисляется по реакции



Масса кислорода на окисление железа составит

$$0,0345 \cdot (16 \cdot 2 \cdot 0,5) / 55,8 = 0,01 \text{ т},$$

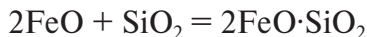
где 16 и 55,8 — атомные массы кислорода и железа соответственно, г/моль.

Масса FeO

$$0,0345 + 0,01 = 0,0445 \text{ т}.$$



Железо ошлаковывается кремнеземом по реакции



Масса  $\text{SiO}_2$  на перевод оксида железа в силикат составит

$$0,0445 \cdot 60 / (2 \cdot 55,8 + 2 \cdot 16) = 0,019 \text{ т},$$

где 60; 55,8; 16 — атомные массы оксида кремния, железа и кислорода соответственно, г/моль.

Общая масса кислорода в шлаке составит

$$0,135 + 0,0338 + 0,01 + 0,018 + 0,05 + 0,012 = 0,258 \text{ т}.$$

Общая масса  $\text{SiO}_2$  в шлаке

$$0,063 + 0,066 + 0,019 = 0,148 \text{ т}.$$

В качестве флюсов используют кварц с минимальным содержанием примесей, чтобы избежать загрязнения анодной меди (табл. 7.9). Все составляющие флюса перейдут в шлак.

Таблица 7.9

Состав кварцевого флюса

Компонент	Формула	Содержание, %
Кремнезем	$\text{SiO}_2$	95,00
Глинозем	$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,00
Прочие	—	3,00
ИТОГО		100,00

Необходимая масса флюса составит

$$0,148 \cdot 100 / 95 = 0,156 \text{ т},$$

где 0,148 — масса  $\text{SiO}_2$  в шлаке, т;

95 — содержание  $\text{SiO}_2$  в кварцевом флюсе (см. табл. 7.9), %.

С флюсом придет  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и прочих

$$0,156 \cdot 2 / 100 = 0,003 \text{ т};$$

$$0,156 \cdot 3 / 100 = 0,005 \text{ т}.$$

Массу  $\text{Al}_2\text{O}_3$  отнесем в «Прочие» компоненты шлака. С учетом этого масса прочих в шлаке составит

$$1,592 + 0,003 + 0,005 = 1,60 \text{ т.}$$

На основании всех проведенных расчетов составляем табл. 7.10.

Таблица 7.10

Масса и состав шлака

Показатель	Компонент									
	Cu	Ni	Pb	Sb	As	Пр.	Fe	O <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	ИТОГО
Масса, т	1,797	0,124	0,228	0,152	0,022	1,60	0,035	0,258	0,148	4,364
Содержание, %	41,18	2,84	5,23	3,49	0,50	36,67	0,79	5,91	3,39	100,00

### 7.1.5. Предварительный расчет воздуха на окисление

При расчете анодной меди, пыли и шлака определили массу кислорода, которая остается в продуктах огневого рафинирования после завершения процесса.

Масса кислорода в анодной меди — 0,518 т (см. табл. 7.7);

в пыли — 0,061 т (см. табл. 7.8);

в шлаке — 0,258 т (см. табл. 7.10).

Общая масса кислорода составит

$$0,518 + 0,061 + 0,258 = 0,837 \text{ т.}$$

Это количество кислорода поступит за счет вводимого в печь воздуха. Поскольку расчет ведем по массе, то используем состав воздуха в массовых процентах: 23 кислорода (21 об. %), 77 азота (79 об. %), — прочими составляющими пренебрегаем. Чтобы в продуктах осталось такое количество кислорода, в печь нужно ввести воздуха

$$0,837 \cdot 100/23 = 3,639 \text{ т,}$$

где 23 — содержание кислорода в воздухе, мас. %.

Весь азот, пришедший с воздухом, перейдет в газ.

На основании всех расчетов составляем таблицу материального баланса процесса (табл. 7.11).

### 7.1.6. Расчет воздуха, необходимого на стадии «окисление меди»

На стадии окисления в печь подают сжатый воздух, расплавленная медь насыщается оксидом — закисью меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ . При температуре в печи 1150–1170 °С, насыщенность меди закисью меди составляет около 8 %. В этом случае масса закиси меди в 350 т расплава составит

$$350 \cdot 8/100 = 28 \text{ т.}$$

Масса кислорода в  $\text{Cu}_2\text{O}$  составит

$$28 \cdot 16/(64 \cdot 2 + 16) = 3,111 \text{ т,}$$

где 64 и 16 — атомные массы меди и кислорода, г/моль.

Содержание кислорода в расплаве

$$3,111 \cdot 100/350 = 0,89 \text{ \%}.$$

Воздух подается непосредственно в расплав, усвоение кислорода расплавом составляет порядка 80 %. С учетом этого в печь необходимо подать кислорода

$$3,111 \cdot 100/80 = 3,889 \text{ т.}$$

В качестве дутья применяем воздух (23 мас. % кислорода, 77 мас. % азота, прочими составляющими пренебрегаем), масса необходимого воздуха будет

$$3,889 \cdot 100/23 = 16,908 \text{ т.}$$

Плотность сжатого воздуха — 2,97 кг/м<sup>3</sup>. Объем воздуха, поданного в печь на стадии окисление,

$$16,908/2,97 = 5693 \text{ м}^3.$$

Азот воздуха полностью перейдет в отходящий газ. Масса азота

$$16,908 - 3,889 = 13,019 \text{ т.}$$

В конце стадии окисления температура в печи снижается до 1130–1160 °С, из расплава удаляется сера в виде  $\text{SO}_2$ , растворенный оксид меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  реагирует с примесями, частично  $\text{Cu}_2\text{O}$  переходит в шлак, и в результате концентрация кислорода в расплаве снижается до 0,3–0,45 %.

*Таблица 7.11*

## Материальный баланс процесса огневого рафинирования

[illegible]

После удаления шлака и пыли в печи остается расплава

$$350,00 - 4,364 - 0,660 = 344,976 \text{ т},$$

где 4,364 и 0,660 — масса шлака и пыли (см. табл. 7.11), т.

Масса кислорода в оставшемся расплаве составит

$$344,976 \cdot 0,35/100 = 1,207 \text{ т},$$

где 0,35 — содержание кислорода в расплаве в конце стадии окисления, %.

В отходящий газ перейдет кислорода

$$3,889 - 1,207 - 0,258 - 0,061 = 2,363 \text{ т},$$

где 0,258 и 0,061 — масса кислорода в шлаке и пыли (см. табл. 7.11), т.

Массу воздуха и отходящего газа заносим в табл. 7.12. Компоненты, перешедшие в газ из шихты, учли при расчете пыли.

Таблица 7.12

Масса воздуха и технологического газа стадии окисления меди

Материал	Масса, т		ИТОГО
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
Воздух на окисление, т	13,019	3,889	16,908
Отходящий газ, т	13,019	2,363	15,382

### 7.1.7. Расчет восстановителя, подаваемого на стадию «восстановление меди»

Восстановление меди начинают после съема шлака. Концентрация кислорода в расплаве в конце периода восстановления должна составлять 0,15 % (см. табл. 7.7), масса кислорода, оставшегося в расплаве (анодной меди), 0,518 т (см. табл. 7.7). Таким образом, масса кислорода, которую необходимо удалить из расплава,

$$1,207 - 0,518 = 0,689 \text{ т},$$

где 1,207 — масса кислорода, оставшаяся в расплаве в конце стадии окисления, т.

Пересчитываем массу кислорода на массу оксида меди Cu<sub>2</sub>O, который нужно восстановить

$$(64 \cdot 2 + 16) \cdot 0,689/16 = 6,203 \text{ т},$$

где 64 и 16 — атомные массы меди и кислорода, г/моль.

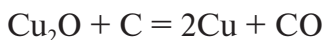
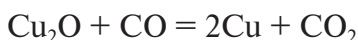
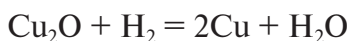
В качестве восстановителя используют древесину, мазут или природный газ. В печи создают восстановительную атмосферу, к концу стадии восстановления температура в печи составляет 1160–1200 °С. Выбираем в качестве восстановителя мазут, состав которого приведен в табл. 7.13.

Таблица 7.13

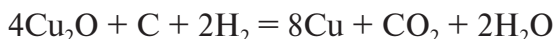
Состав мазута

Компонент	Формула/обозначение	Содержание, %
Углерод	C	87,00
Водород	H	10,00
Кислород	O	0,50
Азот	N <sub>2</sub>	0,60
Сера	S	0,20
Влага	W	1,70
ИТОГО		100,00

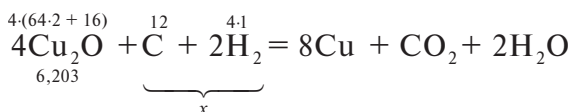
Основные компоненты мазута углерод и водород — сильные восстановители. Водород довольно хорошо растворяется в жидкой меди — до 16,2 см<sup>3</sup> на 100 г Cu, что позволяет вести восстановление Cu<sub>2</sub>O мазутом не только на поверхности, но и в объеме расплава. По этой причине мазут используется чаще, чем другие восстановители. Реакции восстановления меди:



Суммарная реакция восстановления меди мазутом



На восстановление Cu<sub>2</sub>O суммарно понадобится углерода и водорода, т:



$$6,203 \cdot (12 + 4 \cdot 1) / (4 \cdot (64 \cdot 2 + 16)) = 0,516 \text{ т},$$

где 12; 1; 64 и 16 — атомные массы углерода, водорода, меди и кислорода соответственно, г/моль.

Суммарное содержание водорода и углерода в мазуте — 97 % (см. табл. 7.13), теоретически потребуется мазута

$$0,516 \cdot 100/97 = 0,531 \text{ т.}$$

Коэффициент использования мазута — 80–85 %, практическая масса мазута составит

$$0,531 \cdot 100/80 = 0,664 \text{ т.}$$

При восстановлении меди, все составляющие мазута перейдут в газовую фазу. С таким количеством мазута придет

$$m_C = 0,664 \cdot 87/100 = 0,578 \text{ т;}$$

$$m_H = 0,664 \cdot 10/100 = 0,066 \text{ т;}$$

$$m_N = 0,664 \cdot 0,6/100 = 0,003 \text{ т;}$$

$$m_s = 0,664 \cdot 0,2/100 = 0,0013 \text{ т;}$$

$$m_w = 0,664 \cdot 1,7/100 = 0,011 \text{ т;}$$

$$m_O = 0,664 \cdot 0,5/100 = 0,000 \text{ т.}$$

С образующимися технологическими газами уйдет весь кислород, который нужно удалить из расплава в количестве 0,689 т. Общая масса кислорода в технологических газах стадии восстановления составит

$$0,000 + 0,689 = 0,68 \text{ т.}$$

Полученные данные заносим в табл. 7.14.

Таблица 7.14

**Технологические газы стадии восстановления меди**

Компонент	Масса, т	Содержание, %
C	0,578	21,11
H	0,066	2,42
O	0,689	75,870
N <sub>2</sub>	0,003	0,11
S	0,0013	0,045
W	0,011	0,44
ИТОГО	1,3483	100,00

## 7.2. Предварительный расчет теплового баланса огневого рафинирования

### 7.2.1. Статьи прихода тепла

Расчет теплового баланса ведем на основе материального баланса по методике, рассмотренной в гл. 3. Массу и состав материалов, подаваемых в печь, а также продуктов процесса находим по табл. 7.11, 7.12 и 7.14.

Количество тепла, вносимого подаваемыми в печь шихтовыми материалами, кДж, рассчитываем по формуле

$$Q = mc_p \cdot t,$$

где  $m$  — масса материала, кг;

$c_p$  — удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·град);

$t$  — температура материала, °С.

Принимаем, что шихта и флюсы поступают в печь с температурой 20 °С. Массу исходных материалов и продуктов процесса принимаем в килограммах.

Количество тепла, вносимого шихтой, составит

$$Q_{\text{см}} = 350\,000 \cdot 0,381 \cdot 20 = 2\,667\,000 \text{ кДж},$$

где 350 000 — масса шихты, кг (см. табл. 7.11);

0,381 — удельная теплоемкость твердой черновой меди, кДж/(кг·град).

Количество тепла, вносимое кварцевым флюсом, рассчитывается следующим образом. Теплоемкость кварцевого флюса составит

$$(95 \cdot 1,134 + 2 \cdot 1,26)/100 = 1,1025 \text{ кДж/(кг·град)},$$

где 95 и 2 — содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в кварце, % (см. табл. 7.9);

1,134; 1,26 — удельные теплоемкости  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , кДж/(кг·град) (см. табл. 3.6).

Количество тепла, вносимое флюсом, составит

$$Q_{\text{кварц}} = 155,84 \cdot 1,1025 \cdot 20 = 3\,436,27 \text{ кДж}.$$

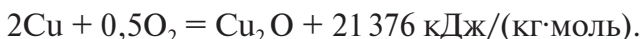


Количество тепла, вносимое воздухом, подаваемым на стадию окисления составит

$$Q_{\text{возд}} = 5693 \cdot 1,30 \cdot 20 = 148018 \text{ кДж},$$

где 5693 — объем воздуха на стадии окисления, м<sup>3</sup>;  
1,3 — удельная теплоемкость воздуха, кДж/(м<sup>3</sup>·град).

Рассчитываем тепло основных экзотермических реакций по методике, рассмотренной в подгл. 3.2. Основные экзотермические реакции — это реакции образования оксидов.

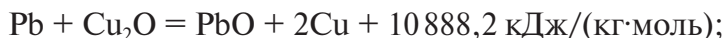


При расчете количества воздуха, подаваемого на стадию окисления, определили массу Cu<sub>2</sub>O в 350 т расплава — 28 т. Масса кислорода в Cu<sub>2</sub>O составила 3,111 т, масса меди в Cu<sub>2</sub>O — 24,889 т. Тепло, выделившееся в результате окисления такой массы меди, составит

$$Q_{\text{Cu}} = mQ_p/M = 24889 \cdot 21376/(64 \cdot 2) = 4156443 \text{ кДж},$$

где  $m$  — масса окислившейся меди, кг;  
 $Q_p$  — тепловой эффект реакции окисления, кДж/(кг·моль);  
64 — атомная масса меди, г/моль.

Тепловые эффекты остальных реакций рассчитываем аналогично расчету выше.



$$Q_{\text{Pb}} = 261 \cdot 10888,2/207 = 13728,60 \text{ кДж},$$

где 261 — суммарная масса свинца в шлаке (0,228 т, или 228 кг) и пыли (0,033 т, или 33 кг), кг (см. табл. 7.11);  
207 — атомная масса свинца, г/моль.



$$Q_{\text{Fe}} = 35,0 \cdot 6574,4/55,8 = 4123,73 \text{ кДж},$$

где 35,0 — масса железа, перешедшая в шлак, кг (см. табл. 7.11);  
55,8 — атомная масса железа, г/моль.



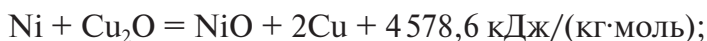
$$Q_{\text{Sb}} = 158,0 \cdot 14616/(2 \cdot 121,8) = 9480,0 \text{ кДж},$$

где 158,0 — суммарная масса сурьмы в шлаке и пыли, кг (см. табл. 7.11);  
121,8 — атомная масса сурьмы, г/моль.



$$Q_{\text{As}} = 131,0 \cdot 9\,225 / (2 \cdot 75) = 8\,056,5 \text{ кДж},$$

где 131,0 — суммарная масса мышьяка в шлаке и пыли, кг (см. табл. 7.11);  
75 — атомная масса мышьяка, г/моль.



$$Q_{\text{Ni}} = 125,0 \cdot 4\,578,6 / 58,7 = 9\,750,00 \text{ кДж},$$

где 125,0 — суммарная масса никеля в шлаке и пыли, кг (см. табл. 7.11);  
58,7 — атомная масса никеля, г/моль.

Суммарное тепло экзотермических реакций

$$4\,156\,443,00 + 13\,728,60 + 4\,123,73 + 9\,480,0 + 8\,056,50 + 9\,750,0 = \\ = 4\,201\,581,83 \text{ кДж}.$$

### 7.2.2. Статьи расхода тепла

**Тепло, затраченное на нагрев и расплавление шихты.** Твердая шихта общей массой 350 т, или 350 000 кг, поступает в печь с температурой 20 °С, в печи температура расплава составляет 1200 °С. Затраты тепла на нагрев и расплавление шихт, кДж, составят

$$Q_{\text{нагрев}} = mc_p (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}),$$

$$Q_{\text{нагрев}} = 350\,000 \cdot 0,49 \cdot (1200 - 20) = 202\,370\,000 \text{ кДж},$$

где 0,49 — удельная теплоемкость жидкой меди, кДж/(кг·град).

**Тепло уносимое анодной медью.** Температура анодной меди, с которой она покидает печь, составляет 1200 °С.

$$Q_{\text{аноды}} = 339\,082 \cdot 0,490 \cdot 1200 = 199\,380\,216,00 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{брак}} = 6\,920 \cdot 0,490 \cdot 1200 = 4\,068\,960,00 \text{ кДж},$$

где 339 082 и 6 920 — масса годных анодов (339 082 кг) и анодного брака (6 920 кг), кг (см. табл. 7.11);

0,490 — удельная теплоемкость жидкой меди, кДж/(кг·град.).

Температура шлака и пыли, с которой они покидают печь, составляет 1200 °С. Рассчитываем теплоемкость шлака и пыли по основным компонентам (табл. 7.15) по методике, рассмотренной в гл. 3. Массы шлаков и пыли приведены в табл. 7.11. Теплоемкости отдельных соединений находим по табл. 3.6.

Таблица 7.15

## Теплоемкость шлака и пыли

Соединение	Содержание в материале, %	$c_p$ , кДж/(кг·град)	Доля в теплоемкости материала
Шлак			
Cu <sub>2</sub> O	27,799	0,300	$27,799 \cdot 0,3/100 = 0,083$
PbO	5,624	0,140	$5,624 \cdot 0,14/100 = 0,0079$
NiO	3,617	0,510	0,0184
FeO	1,020	0,840	0,0086
SiO <sub>2</sub>	3,392	1,134	0,0385
Cu	16,473	0,490	0,0807
Прочие	42,075	0,714	0,300
ИТОГО теплоемкость шлака			0,5371
Пыль			
Cu <sub>2</sub> O	29,45	0,300	$29,45 \cdot 0,300/100 = 0,088$
PbO	5,31	0,140	$5,31 \cdot 0,140/100 = 0,0074$
NiO	0,13	0,510	0,0006
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,17	0,790	0,0092
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,86	0,75	0,1639
Прочие	42,08	0,900	0,3787
ИТОГО теплоемкость пыли			0,648

$$Q_{\text{шлак}} = 4363 \cdot 0,5371 \cdot 1200 = 2812040,76 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{пыль}} = 660 \cdot 0,648 \cdot 1200 = 513216,00 \text{ кДж}.$$

Технологические газы образуются на стадии окисления и восстановления меди. Температура в печи меняется на разных стадиях процесса, для упрощенного расчета теплового баланса используем среднюю температуру, с которой газы покидают печь 1200 °С.

Масса газов приведена в табл. 7.12 и 7.14. Объединим данные в табл. 7.16 и рассчитаем состав технологических газов.

Таблица 7.16

**Технологические газы операций окисления и восстановления, кг**

Стадия	Масса, кг					ИТОГО
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C	H <sub>2</sub>	Прочие	
Окисление	13 019,00	2 363,00	—	—	—	15 382,00
Восстановление	1 000,00	690,00	192,00	22,00	4,00	1 908,00
ИТОГО, кг	14 019,00	3 053,00	192,00	22,00	4,00	17 290,00
Содержание, мас. %	81,08	17,66	1,11	0,13	0,02	100,00

Углерод в газах содержится в виде CO<sub>2</sub>; масса кислорода, связанного в CO<sub>2</sub> в газах, составит

$$192,0 \cdot 16 \cdot 2/12 = 512 \text{ кг},$$

где 16 и 12 — атомные массы кислорода и углерода, г/моль.

Общая масса CO<sub>2</sub> в газах

$$192,0 + 512,0 = 704,0 \text{ кг, или } 4,07 \% \text{ от общей массы газа.}$$

Масса оставшегося кислорода в газах составит

$$3 053,00 - 512,00 = 2 541,00 \text{ кг, или } 14,70 \% \text{ от общей массы газа.}$$

На основании полученных данных рассчитаем объем полученных газов и состав газа в объемных процентах (табл. 7.17).

Таблица 7.17

**Объем технологических газов**

Соединение	Содержание, мас. %	Молекулярная масса, г/моль	Объем, м <sup>3</sup>	Содержание, об. %
N <sub>2</sub>	81,08	28	$81,08 \cdot 22,4/28 = 64,86$	$64,87 \cdot 100/78,66 = 82,46$
CO <sub>2</sub>	4,07	44	$4,07 \cdot 22,4/44 = 2,07$	$2,07 \cdot 100/78,66 = 2,63$
O <sub>2</sub>	14,70	32	$14,70 \cdot 22,4/32 = 10,29$	$10,29 \cdot 100/78,66 = 13,08$
H <sub>2</sub>	0,13	2	$0,13 \cdot 22,4/2 = 1,45$	$1,43 \cdot 100/78,66 = 1,83$
Прочие	0,02	—	—	—
ИТОГО	100,00	—	78,67	100,00

Объем технологических газов составит

$$17 290,00 \cdot 78,66/100 = 13 600,31 \text{ м}^3,$$

где 17 290,00 — общая масса технологических газов, кг (см. табл. 7.16).

Теплоемкость отдельных составляющих газа при температуре 1200 °С находим по табл. 3.8 и рассчитываем теплоемкость отходящих технологических газов

$$c_p^{\text{тех}} = (82,47 \cdot 1,420 + 2,64 \cdot 2,272 + 13,08 \cdot 1,15 + 1,81 \cdot 1,35) \cdot 0,01 = 1,4057 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град}).$$

Тепло, уносимое технологическими газами, составит

$$13\,600,31 \cdot 1,4057 \cdot 1200 = 29\,941\,546,00 \text{ кДж}.$$

Потери тепла в окружающую среду — это потери через стены, свод, лещады, загрузочные окна и летки печи, затраты тепла на водоохлаждаемые элементы печи и т. д. В качестве плавильного агрегата выбрали стационарную рафинировочную печь объемом по расплаву 350 т. Общая продолжительность процесса рафинирования в среднем составляет 24 ч (см. табл. 7.1).

Рассчитаем потери тепла в окружающую среду для стационарной печи. Если в качестве рафинировочной печи выбираем наклоняющуюся печь, то потери тепла в окружающее пространство можно рассчитать аналогично расчету конвертера (см. гл. 6).

Рассчитаем потери тепла через футеровку стационарной печи, кДж/ч, в единицу времени

$$Q_{\text{кл}} = ((t_{\text{кл}} - t_{\text{нар}})/(\sum (s_i/\lambda_i) + (1/\alpha_k))F_{\text{нар}} \cdot 3,6,$$

где  $t_{\text{кл}}$ ,  $t_{\text{нар}}$  — температура внутренней и наружной поверхности, °С;

$s_i$  — толщина  $i$ -го слоя огнеупорной кладки, м;

$\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности огнеупора при рабочей температуре для  $i$ -го слоя огнеупорной кладки, Вт/(м·град);

$\alpha_k$  — коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной поверхности к воздуху, Вт/(м²·град);

$F_{\text{нар}}$  — площадь наружной поверхности кладки, м²;

3,6 — коэффициент перевода ватт в киловатты в час.

**Потери тепла через лещады печи.** Лещады выполнены из периклазохромитовых (внутренняя часть) и шамотных (внешняя часть) огнеупоров.

Площадь лещади  $F = 68,75 \text{ м}^2$ , внешняя поверхность лещади не соприкасается с воздухом, поэтому  $\alpha_k$  пренебрегаем. Внутренняя темпе-

ратура лещади — 1200 °С, температура внешней поверхности — 50 °С. Расчет теплового сопротивления футеровки печи приведен в табл. 7.18.

Таблица 7.18

## Тепловое сопротивление футеровки лещади печи

Огнеупоры	$\lambda_i$ при рабочей температуре, Вт/(м·град)	Толщина слоя $s_i$ , м	Тепловое сопротивление $s_i/\lambda_i$
Периклазохромитовые ПХП	2,4	0,38	0,1583
Периклазохромитовые ПХС	2,7	0,23	0,0852
Шамот	0,85	0,23	0,2706
ИТОГО	—	—	0,5141

$$Q_{\text{л}} = ((1200 - 50)/0,5141) \cdot 68,75 \cdot 3,6 = 553\,637,45 \text{ кДж/ч.}$$

**Потери через свод.** Площадь свода печи  $F = 70,27 \text{ м}^2$ ; температура свода в печи (средняя) — 1400 °С; температура внешней поверхности — 1000 °С; огнеупоры — периклазохромитовые ПХС  $\lambda_i = 2,7$ ; толщина футеровки — 0,38 м. Рассчитываем тепловое сопротивление свода печи

$$s_i/\lambda_i = 0,38/2,7 = 0,1407.$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности свода к воздуху внутри печи составляет  $\alpha_k = 11,6 \text{ Вт/(м}^2\text{·град)}$ . Потери тепла через свод составят

$$Q_{\text{св}} = ((1400 - 1000)/(0,1407 + 1/11,6)) \cdot 70,27 \cdot 3,6 = 22\,960,42 \text{ кДж/ч.}$$

**Потери через боковые и торцевые стены печи.** Площадь стен (боковых и торцевых) печи — 98,15 м<sup>2</sup>; средняя температура стен в печи — 1300 °С; температура внешней поверхности футеровки — 450 °С; огнеупоры — периклазохромитовые ПХС  $\lambda_i = 2,7$ ; толщина футеровки — 0,58 м. Рассчитываем тепловое сопротивление стен печи

$$s_i/\lambda_i = 0,58/2,7 = 0,2148.$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности стен печи к воздуху внутри печи составляет  $\alpha_k = 11,63 \text{ Вт/(м}^2\text{·град)}$ . Потери тепла через стены составят

$$Q_{\text{стен}} = ((1300 - 450)/(0,2148 + 1/11,63)) \cdot 98,15 \cdot 3,6 = 1001\,129,9 \text{ кДж/ч.}$$

Суммарные потери через лещады, свод и стены за 1 ч составят

$$553\,637,45 + 22\,960,42 + 1\,001\,129,9 = 1\,577\,727,7 \text{ кДж/ч.}$$

По производственным данным эти потери составляют 40 % тепла в окружающее пространство. Общие потери тепла в окружающее пространство составят

$$1\,577\,727,7 \cdot 100/40 = 3\,944\,319,25 \text{ кДж/ч.}$$

За все время плавки, 24 ч, потери в окружающее пространство составят

$$Q_{\text{окр прост}} = 3\,944\,319,25 \cdot 24 = 94\,663\,662 \text{ кДж.}$$

Все полученные данные сводим в табл. 7.19.

Таблица 7.19

**Предварительный тепловой баланс (без топлива и топочных газов)**

Приход тепла		Расход тепла	
Статья баланса	кДж	Статья баланса	кДж
Шихта	2667000,00	Аноды годные	199380216,00
Флюс	3436,27	Брак анодов	4068960,00
Дутье	148018,00	Шлак	2812040,76
Экзотермические реакции	4201601,83	Пыль	513216,00
		Газ технологический	29165463,60
		Нагрев и расплавление	202370000,00
		Потери в окружающую среду	94663662,00
ИТОГО	7020056,10	ИТОГО	532973558,36
		Невязка баланса	−551193824,00

### 7.3. Расчет горения топлива и составление итогового теплового баланса

Основным источником тепла при анодной плавке является горение топлива. Таким образом, нужно рассчитать необходимое количество топлива для составления окончательного теплового баланса.

Для сжигания топлива потребуется кислород, а в результате горения топлива образуется большое количество топочных газов, которые

унесут с собой значительное количество тепла. Поэтому в тепловом балансе изменится как приходная, так и расходная части.

В качестве топлива используем природный газ (табл. 7.20). Температура воспламенения газа составляет 650–700 °С, газ не имеет цвета и запаха. Газовоздушная смесь с объемной долей газа 5–15 % взрывоопасна.

Таблица 7.20

Объемный состав природного газа

Компонент	Формула	Содержание, об. %
Метан	$\text{CH}_4$	97,87
Этан	$\text{C}_2\text{H}_6$	1,30
Пропан	$\text{C}_3\text{H}_8$	0,14
Азот	$\text{N}_2$	0,65
Углекислый газ	$\text{CO}_2$	0,04
ИТОГО		100,00

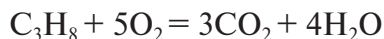
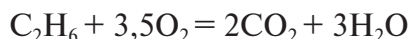
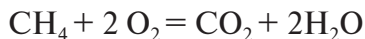
Для составления уравнения теплового баланса рассчитаем количество тепла от сжигания топлива, объем кислорода на горение, объем воздуха, объем и состав топочных газов на 1 м<sup>3</sup> природного газа заданного состава.

Тепловой эффект горения топлива, кДж/м<sup>3</sup>, рассчитаем по эмпирической приведенной формуле Д. И. Менделеева

$$Q_{\text{РН}} = 358,18 \cdot \% \text{CH}_4 + 637,48 \cdot \% \text{C}_2\text{H}_6 + 912,3 \cdot \% \text{C}_3\text{H}_8;$$

$$Q^1_{\text{РН}} = 358,18 \cdot 97,87 + 637,48 \cdot 1,30 + 912,3 \cdot 0,14 = 36\,011,52 \text{ кДж/м}^3.$$

При горении газа протекают следующие реакции



Следовательно, для горения 1 м<sup>3</sup> природного газа теоретически потребуется кислорода, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,

$$V^{\text{т}}_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot (2 \cdot \% \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \% \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \% \text{C}_3\text{H}_8);$$

$$V^{\text{т}}_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot (2 \cdot 97,87 + 3,5 \cdot 1,30 + 5 \cdot 0,14) = 2,01 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$



Коэффициент избытка кислорода составляет 1,1. С учетом коэффициента избытка практический объем кислорода составит

$$V^{\text{пр}}_{\text{O}_2} = 2,01 \cdot 1,1 = 2,21 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем практически подаваемого в печь воздуха составит,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа,

$$V^1_{\text{возд}} = (1 + k) V^{\text{пр}}_{\text{O}_2},$$

где  $k$  — объемное соотношение азота и кислорода в воздухе.

Содержание кислорода в воздухе — 21 об. %, азота — 79 об. %, прочими составляющими газа пренебрегаем,

$$K = 79/21 = 3,76;$$

$$V^1_{\text{возд}} = (1 + 3,76) \cdot 2,21 = 10,52 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Количество и состав продуктов горения — топочных газов на  $1 \text{ м}^3$  природного газа — рассчитываем по формулам,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,

$$V^1_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (\% \text{CO}_2 + \% \text{CH}_4 + 2 \cdot \% \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \% \text{C}_3\text{H}_8),$$

где  $\% \text{CO}_2$ ;  $\% \text{CH}_4$ ;  $\% \text{C}_2\text{H}_6$ ;  $\% \text{C}_3\text{H}_8$  — объемное содержание компонентов в природном газе, % (см. табл. 7.20).

$$V^1_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (0,04 + 97,87 + 2 \cdot 1,3 + 3 \cdot 0,14) = 1,009 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V^1_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \cdot (2 \cdot \% \text{CH}_4 + 3 \cdot \% \text{C}_2\text{H}_6 + 4 \cdot \% \text{C}_3\text{H}_8);$$

$$V^1_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \cdot (2 \cdot 97,87 + 3 \cdot 1,3 + 3 \cdot 0,14) = 2,006 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V^1_{\text{N}_2} = 0,01 \cdot \% \text{N}_2 + k \cdot V^{\text{пр}}_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot 0,65 + 3,76 \cdot 2,209 = 8,312 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Кроме продуктов горения, в топочный газ перейдет неизрасходованный кислород,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,

$$V^1_{\text{O}_2} = V^{\text{пр}}_{\text{O}_2} - V^{\text{т}}_{\text{O}_2} = 2,21 - 2,01 = 0,20 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Все полученные значения сводим в табл. 7.21, рассчитываем объем топочных газов на  $1 \text{ м}^3$  природного газа заданного состава и состав топочного газа в объемных процентах.

Таблица 7.21

**Объем и состав топочных газов**

Компонент	Объем, м <sup>3</sup>	Содержание, об. %
CO <sub>2</sub>	1,009	8,16
N <sub>2</sub>	8,312	74,03
H <sub>2</sub> O	2,002	16,18
O <sub>2</sub> свободн	0,201	1,63
ИТОГО	11,528	100,00

Топочные газы покидают печь совместно с технологическими газами, средняя температура газа на выходе из печи — 1200 °С. По табл. 3.8 находим теплоемкости отдельных составляющих топочного газа при температуре 1200 °С и рассчитываем теплоемкость отходящих топочных газов

$$c_{\text{топ}}^{\text{топ}} = (8,16 \cdot 2,272 + 16,19 \cdot 1,781 + 74,03 \cdot 1,42 + 1,63 \cdot 1,15) \cdot 0,01 = \\ = 1,543 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град}).$$

Обозначим объем необходимого природного газа, м<sup>3</sup>, —  $x$ . Количество тепла, которое выделится при сгорании такого количества газа, кДж,

$$Q_{\text{РН}} = Q_{\text{РН}}^1 \cdot x = 36\,014,30x,$$

где  $Q_{\text{РН}}^1$  — тепловой эффект горения газа, рассчитанный по формуле Д. И. Менделеева, кДж/м<sup>3</sup>.

Объем воздуха, который необходимо подать в печь для сжигания  $x$ , м<sup>3</sup>, топлива, составит

$$V_{\text{возд}} = V_{\text{возд}}^1 \cdot x = 10,52x.$$

Воздух, который подают для горения топлива, подогревают перед подачей до температуры 300 °С. Теплоемкость воздуха при такой температуре составляет 1,319 кДж/(м<sup>3</sup>·°С) (см. табл. 3.5). С воздухом в печь придет тепла, кДж,

$$Q_{\text{возд}} = (10,52x) \cdot 1,319 \cdot 300 = 4\,162,76x.$$

Объем топочных газов, которые образуются при сжигании  $x$ , м<sup>3</sup>, топлива,

$$V_{\text{топ г}} = 12,369x,$$

где 12,369 — объем топочных газов, которые образуются при сжигании 1 м<sup>3</sup> топлива, м<sup>3</sup> (см. табл. 7.21).

Топочные газы покидают печь с температурой 1200 °С, рассчитанная теплоемкость топочных газов — 1,554 кДж/(м<sup>3</sup>·град). Таким образом, с топочными газами уйдет тепла, кДж,

$$Q_{\text{топ г}} = (12,369x) \cdot 1,543 \cdot 1200 = 22\,902,44x.$$

Составляем уравнение теплового баланса процесса на основании полученных данных и табл. 7.19.

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}},$$

$$Q_{\text{прих}} = 7\,020\,056,10 + 4162,76x + 36\,014,30x,$$

где 7 020 056,10 — сумма всего пришедшего в печь тепла без топлива и тепла воздуха на горение (см. табл. 7.19), кДж.

$$Q_{\text{расх}} = 532\,973\,558,36 + Q_{\text{топ г}} = 532\,973\,558,36 + 22\,902,44x,$$

где 532 973 558,36 — сумма всего ушедшего из печи тепла без топочных газов (см. табл. 7.19), кДж.

Уравнение теплового баланса

$$7\,020\,056,10 + 4162,76x + 36\,014,30x = 532\,973\,558,36 + 22\,902,44x;$$

$$x = 31\,907,725 \text{ м}^3.$$

Таким образом, общий объем природного газа для отопления — 31 907,725 м<sup>3</sup>, или на 1 т шихты

$$31\,907,725/350 = 91,165 \text{ м}^3/\text{т}.$$

При сгорании такого количества природного газа выделится тепла

$$Q_{\text{РН}} = 31\,907,725 \cdot 36\,014,3 = 1\,149\,134\,380,468 \text{ кДж}.$$

Потребуется воздуха

$$V_{\text{возд}} = 10,52 \cdot 31\,907,725 = 335\,669,27 \text{ м}^3.$$

С этим объемом воздуха придет тепла, кДж,

$$Q_{\text{возд}} = 335\,669,27 \cdot 1,319 \cdot 300 = 132\,824\,330,14.$$

При сгорании образуется топочных газов

$$V_{\text{топ г}} = 12,369 \cdot 31\,907,725 = 394\,666,65 \text{ м}^3.$$

С этим объемом топочных газов из печи уйдет тепла

$$Q_{\text{топ г}} = 394\,666,65 \cdot 1,543 \cdot 1200 = 730\,764\,769,14 \text{ кДж}.$$

По результатам расчетов составляем итоговую таблицу теплового баланса огневого рафинирования меди (табл. 7.22) и рассчитываем долю каждой статьи баланса в общем приходе и расходе тепла.

Таблица 7.22

**Тепловой баланс огневого рафинирования меди**

Приход тепла			Расход тепла		
Статья баланса	кДж	%	Статья ба- ланса	кДж	%
Шихта	2 667 000,00	0,21	Аноды год- ные	199 380 216,00	15,47
Флюс	3 436,27	0,00	Брак анодов	4 068 960,00	0,32
Дутье	148 018,00	0,01	Шлак	2 812 040,76	0,22
Экзотермиче- ские реакции	4 201 601,83	0,33	Пыль	513 216,00	0,04
Воздух на горе- ние топлива	132 824 308,14	10,30	Газ техноло- гический	29 165 463,60	2,26
Горение топлива	1 149 134 368,44	89,15	Нагрев и расплавле- ние	202 370 000,00	15,70
ИТОГО	1 288 978 732,68	100,00	Потери в окружаю- щую среду	94 663 662,00	9,30
			Газ топоч- ный	730 764 770,11	56,69
			ИТОГО	1 263 738 328,47	100,00
Невязка баланса				116,5	0,000 009

Невязка баланса образуется за счет округления значений до сотых долей единиц, и такая величина невязки является допустимой. Таким образом, основной источник тепла при огневом рафинировании — горение топлива. Подогрев воздуха, необходимого для горения топли-

ва, позволяет снизить расход топлива — доля тепла, вносимого воздухом — 10,3 % в общем тепловом балансе. Наибольшее количество тепла уносят топочные газы — 56,69 %.

### **Контрольные вопросы**

1. С какой целью проводят огневое рафинирование?
2. Какие примеси черновой меди являются наиболее трудноудаляемыми?
3. Какие требования предъявляют к медным анодам?
4. Какая статья расхода тепла является основной?
5. В каких печах проводят огневое рафинирование?

---

## Список библиографических ссылок

---

1. Аветисян Х. К. Металлургия меди. М. : Metallurgizdat, 1954. 464 с.
2. Газарян Л. М. Пирометаллургия меди. М. : Metallurgiya, 1965. 358 с.
3. Расчеты пиропроцессов и печей цветной металлургии / Д. А. Диомидовский [и др.]. М. : Metallurgiya, 1963. 460 с.
4. Шалыгин Л. М. Конвертерный передел в цветной металлургии. М. : Metallurgiya. 1965. 158 с.
5. Технологические расчеты в металлургии тяжелых цветных металлов / Н. В. Гудима, Ю. А. Карасев, Б. Б. Кистяковский, П. Е. Колкер, Б. И. Равданис. М. : Metallurgiya, 1977. 255 с.

---

# Оглавление

---

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Расчет шихты.....</b>	<b>4</b>
1.1. Порядок расчета.....	4
1.2. Расчет состава шихты без флюсов.....	4
1.3. Расчет рационального состава медного концентрата .....	6
1.4. Расчет рационального состава золотосодержащего концентрата .....	11
1.5. Расчет рационального состава пыли циклонов шахтных печей .....	14
1.6. Расчет рационального состава медного концентрата от обогащения шлаков .....	16
1.7. Рациональный состав шихты без флюсов.....	21
Контрольные вопросы .....	25
<b>2. Штейны и шлаки медной плавки .....</b>	<b>26</b>
2.1. Свойства штейнов и шлаков медной плавки .....	26
2.2. Основные процессы получения медных штейнов .....	31
Контрольные вопросы.....	34
<b>3. Тепловой баланс процесса.....</b>	<b>35</b>
3.1. Статьи прихода и расхода тепла.....	35
3.2. Расчет тепловых эффектов реакций .....	37
3.3. Расчет тепла от горения топлива .....	41
3.4. Тепло компонентов шихты и продуктов плавки.....	44
3.5. Перевод массы газов в объем .....	47
Контрольные вопросы.....	49
<b>4. Шахтная плавка первичного и вторичного     медьсодержащего сырья .....</b>	<b>50</b>
4.1. Расчет материального баланса совместной плавки первичного и вторичного сырья.....	55
4.1.1. Предварительный расчет шихты без флюсов .....	55
4.1.2. Расчет количества и состава штейна и черной меди ....	61

4.1.3. Расчет пылевыноса .....	65
4.1.4. Предварительный расчет массы и состава шлака.....	69
4.1.5. Расчет количества флюсов.....	71
4.1.6. Расчет количества дутья и состава газов .....	75
4.2. Расчет теплового баланса совместной плавки первичного и вторичного сырья.....	79
4.2.1. Приход тепла.....	79
4.2.2. Расход тепла .....	82
Контрольные вопросы.....	86
<b>5. Плавка в агрегате с погружной фурмой — процесс Ausmelt .....</b>	<b>87</b>
5.1. Расчет материального баланса плавки медного сырья в печи Ausmelt .....	91
5.1.1. Расчет состава шихты .....	91
5.1.2. Расчет количества и состава штейна .....	96
5.1.3. Расчет пылевыноса .....	98
5.1.4. Предварительный расчет массы и состава шлака.....	101
5.1.5. Расчет количества флюсов.....	103
5.1.6. Расчет количества топлива, дутья и состава газов.....	107
5.2. Расчет теплового баланса плавки Ausmelt.....	113
5.2.1. Приход тепла.....	113
5.2.2. Расход тепла .....	119
Контрольные вопросы.....	124
<b>6. Конвертирование медных штейнов .....</b>	<b>125</b>
6.1. Расчет материального баланса конвертирования .....	132
6.1.1. Исходные данные для расчета.....	132
6.1.2. Расчет материального баланса первого периода конвертирования.....	136
6.2. Расчет теплового баланса первого периода конвертирования.....	148
6.2.1. Приход тепла.....	148
6.2.2. Расход тепла .....	150
6.3. Расчет теплового баланса второго периода конвертирования.....	156
Контрольные вопросы.....	160
<b>7. Огневое рафинирование черновой меди .....</b>	<b>161</b>
7.1. Расчет материального баланса по основным компонентам...164	
7.1.1. Расчет состава шихты .....	164
7.1.2. Расчет массы и состава анодной меди .....	166



---

7.1.3. Расчет массы и состава пыли.....	168
7.1.4. Расчет массы и состава шлака .....	170
7.1.5. Предварительный расчет воздуха на окисление .....	175
7.1.6. Расчет воздуха, необходимого на стадии «окисление меди».....	176
7.1.7. Расчет восстановителя, подаваемого на стадию «восстановление меди» .....	177
7.2. Предварительный расчет теплового баланса огневого рафинирования.....	180
7.2.1. Статьи прихода тепла.....	180
7.2.2. Статьи расхода тепла.....	182
7.3. Расчет горения топлива и составление итогового теплового баланса .....	187
Контрольные вопросы.....	193
<b>Список библиографических ссылок .....</b>	<b>194</b>

*Учебное издание*

**Колмачихина** Ольга Борисовна,  
**Полыгалов** Сергей Эдуардович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ  
ПО ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ МЕДИ**

Редактор И. В. Меркурьева  
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 16.06.2021. Формат 70×100/16.  
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 16,0.  
Уч.-изд. л. 9,8. Тираж 30 экз. Заказ 121.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13  
Факс: +7 (343) 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>



